Luís Filipe Martins Mendes

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

Métodos Clássicos de Protecção de Sistemas Elevatórios Contra o Golpe de Aríete

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente, perfil Engenharia Sanitária

Orientador: David José Fonseca Pereira, Prof. Doutor, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Pedro Manuel da Hora Santos Coelho
Arguente(s): Eng. João Maria Matos Lopes da Fonseca
Vogal(ais): Prof. Doutor David José Fonseca Pereira

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2011

MÉTODOS CLÁSSICOS DE PROTECÇÃO DE SISTEMAS ELEVATÓRIOS CONTRA O GOLPE DE ARÍETE

DEDICATÓRIA

À minha filha, Leonor

AGRADECIMENTOS

Ao Professor David Pereira, pela confiança que sempre depositou no meu trabalho, pelo livro de conhecimento que me abriu, e, acima de tudo, pela amizade.

À Sofia, pelo carinho e pelas condições que criou, para que tudo fosse possível.

Aos meus avós, pelos valores que me transmitiram ao longo da vida, e pela inspiração que representam para mim, em especial:

À minha avó Bia, pelo exemplo de dedicação ao trabalho, e ao meu avô Afonso, pelo equilíbrio e sensatez dos seus conselhos.

À minha avó Rosa, pela convicção e força para lutar contra as adversidades, e ao meu avô António, pela inteligência e humildade, que o caracterizavam.

Ao meu irmão, pelo apoio e companheirismo.

Aos meus pais, Amélia e Nicolau, por tudo…

A todos expresso a minha sincera gratidão.

SUMÁRIO

A ocorrência de regimes transitórios, em particular do golpe de aríete e subsequente propagação de ondas de pressão, em sistemas elevatórios de água e águas residuais, é um acontecimento normal e frequente, que acompanha qualquer alteração nas suas condições normais de funcionamento. As circunstâncias mais violentas, associadas ao golpe de aríete, normalmente, resultam do corte de energia eléctrica de uma bomba, com consequente paragem da mesma.

O presente texto apresenta em detalhe, um conjunto de conceitos básicos que permitem compreender as causas e os efeitos da propagação das ondas de pressão, decorrentes dos regimes transitórios. É feita, também, uma descrição abrangente de alguns métodos práticos de protecção contra o golpe de aríete. Um exemplo simples, baseado em métodos expeditos, foi preparado para ilustrar a sequência de passos de cálculo, associados ao estudo preliminar do golpe de aríete, numa conduta elevatória.

Palavras-chave: Escoamento em Pressão, Regimes Transitórios, Golpe de Aríete, Sistemas Elevatórios, Reservatório de Ar Comprimido.

ABSTRACT

The occurrence of pressure surge, particularly waterhammer and pressure transient propagation, within any force main of either water and wastewater pumping systems is a normal and frequent event that accompanies any change in the system normal operating condition. The most severe waterhammer circumstances generally result during pump shutdown of power failure.

This text presents a detailed fundamental understanding of transient propagation causes and effects. A largely description of practical methods of waterhammer control is also included. A simple demonstration example, based on quick methods of analysis, has been prepared to help illustrate the complete procedure of a preliminary waterhammer study in a force main.

Keywords: Pressure Flow, Hydraulic Transients, Waterhammer, Pumping Stations, Air Chamber.

SIMBOLOGIA

A	Área da secção transversal de escoamento, de uma conduta
c	Velocidade de propagação de uma onda elástica
C	Coeficiente de fecho, função do gradiente hidráulico H_m/L
$C_{0\ mín}$	Volume mínimo de ar comprimido, no interior de um reservatório
C'	Volume total de um reservatório de ar comprimido
D	Diâmetro interno de uma conduta
e	Espessura da parede de uma conduta
E_m	Módulo de elasticidade de Young
g	Aceleração da gravidade
H	Altura, carga hidráulica
H_0	Altura de elevação de uma bomba, para as condições do regime permanente
H_0^*	Carga absoluta em regime permanente
H_{RV}	Cota piezométrica de rotura da veia líquida
ΔH	Perda de carga
k	Módulo de compressibilidade volumétrica
K	Coeficiente de perda de carga
K_L	Coeficiente adimensional, função do comprimento da conduta;
L	Comprimento total de uma conduta
l	Comprimento de um dado troço de uma conduta
L_c	Comprimento crítico
p	Pressão do escoamento, num determinado ponto
p_0	Pressão do escoamento, em regime permanente

p_v	Tensão de vapor de água
P_{atm}	Pressão atmosférica
ΔP_{cr}	Diferencial de pressão crítico
p_M	Pressão máxima de serviço admissível da conduta
p_{ie}	Pressão interna de esmagamento da conduta
PD^2	Parâmetro característico da inércia de um grupo electrobomba
Q_0	Caudal escoado em regime permanente
ΔQ	Variação de caudal
T, t	Tempo
T_a	Tempo de anulação de caudal
V	Velocidade de escoamento
V_0	Velocidade de escoamento, em regime permanente
ΔV	Variação da velocidade de escoamento
z	Cota do eixo de uma conduta
θ	Ângulo que o eixo da conduta forma com a horizontal
μ	Coeficiente de Poisson
ρ	Massa específica do fluido
ρ^*	Parâmetro característico da conduta

ACRÓNIMOS E SIGLAS

LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
RAC	Reservatório de Ar Comprimido
RUD	Reservatório Unidireccional
RHAAA	Reservatório Hidropneumático de Alimentação Automática de Ar

ÍNDICE DE MATÉRIAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO

Qualquer alteração, nas condições de funcionamento de uma conduta elevatória, faz com que, o respectivo escoamento se processe, durante um determinado período de tempo, segundo um regime variável. Os termos choque hidráulico ou golpe de aríete, são aplicados aos casos em que, do referido regime variável, resultem variações de pressão consideráveis, quando comparadas com as inerentes ao regime permanente, e a mobilização das forças elásticas da conduta e do líquido.

Seja no âmbito do projecto, seja no âmbito da exploração de condutas elevatórias de saneamento básico, o fenómeno do golpe de aríete, constitui um dos temas que requer a maior atenção, por parte dos projectistas e técnicos de operação e manutenção, dedicados aos sistemas hidráulicos, em que estão integradas as condutas. O referido fenómeno constitui, dependendo da intensidade dos seus efeitos, um sério risco de ocorrência de acidentes, em instalações elevatórias. Uma avaliação íntegra dos efeitos, associados a eventuais regimes variáveis, poderá prevenir graves deficiências, no funcionamento deste género de circuitos.

As condutas elevatórias, podem transportar fluidos de diversas naturezas, mas, nesta dissertação, só se tratará do transporte de água, no estado natural ou alterado pela acção humana (com melhorias, para utilizações exigentes, ou contaminada pela mistura de resíduos, na própria utilização).

Almeida (1979), hierarquiza um conjunto de procedimentos associados ao projecto de sistemas elevatórios, em particular, o estudo dos regimes transitórios. Segundo o autor, a referida fase de projecto, deve envolver a seguinte sequência de processos: Análise Preliminar do Golpe de Aríete, Selecção de Dispositivos de Protecção Contra o Golpe de Aríete, Análise do Comportamento do(s) Dispositivo(s) Seleccionado(s) e, finalmente, Disposições Construtivas e Ensaios.

Na fase de análise preliminar, é feita uma avaliação do comportamento das condutas elevatórias, face às variações extremas de pressão, resultantes da ocorrência de regimes transitórios, sem dispositivos de protecção. Normalmente, nesta fase, admite-se como causa da perturbação das condições do escoamento, em regime permanente, a paragem súbita dos grupos electrobomba, da estação elevatória em estudo, e a hipótese de anulação instantânea do caudal. Apesar dos avanços informáticos, que transformaram as ferramentas computorizadas em questões técnicas triviais, continuam a ser os métodos expeditos, os mais utilizados nesta fase.

Quando o resultado da análise preliminar, determina a necessidade de recorrer a mecanismos, de protecção contra os efeitos do golpe de aríete, o passo seguinte será, a selecção de dispositivos adequados para o efeito. Tal como na fase anterior, é habitual o recurso a métodos empíricos, para determinação aproximada, das características dos dispositivos.

Seleccionado o dispositivo, procede-se à análise do seu comportamento, para o conjunto de condições mais desfavoráveis, que possam, eventualmente, ocorrer. Para este processo de análise,

devem ser aplicados modelos de cálculo, que produzam resultados mais rigorosos, em particular, o método gráfico de Bergeron ou o método das características.

A fase de projecto é concluída, com a verificação das disposições construtivas, preconizadas previamente, e com os ensaios de recepção de equipamentos especiais. A fase dedicada a disposições construtivas e ensaios, permite avaliar os métodos de cálculo utilizados.

No que diz respeito à análise do golpe de aríete, há muito que os métodos de cálculo automático, se afirmaram como os instrumentos mais versáteis, rigorosos e apelativos, para engenheiros e outros técnicos, ligados a este campo da ciência hidráulica.

No passado, na ausência de sistemas computacionais, foram desenvolvidos diversos métodos simplificados, para possibilitar uma análise expedita, dos regimes variáveis em pressão. Simultaneamente, foram sendo publicados, em vários periódicos de referência na comunidade científica, processos matemáticos e ábacos, para pré-dimensionamento de dispositivos de protecção de condutas, contra os efeitos do choque hidráulico. Alguns desses métodos, foram os eleitos, durante períodos de tempo extensos, por projectistas de infra-estruturas hidráulicas, na elaboração dos estudos correspondentes.

Actualmente, num universo mais competitivo, o tempo disponível para a elaboração de estudos e projectos, é bastante reduzido, pelo que a eficiência e rigor das ferramentas de cálculo, se tornam requisitos imperativos, para os consultores de engenharia. Deste modo, os métodos clássicos, mais trabalhosos, morosos e, relativamente a alguns dos quais, estará associada uma considerável margem de erro nos resultados, foram sendo abandonados, de forma natural e gradual. Para uma grande parcela, da nova geração de engenheiros hidráulicos (civis, mecânicos, sanitaristas, agrónomos), estes métodos expeditos são, praticamente, desconhecidos.

Previamente aos métodos de cálculo, associados ao dimensionamento e análise de comportamento, de dispositivos para protecção anti aríete, torna-se essencial a compreensão dos conceitos básicos, que norteiam os vários processos de protecção. É neste sentido, que se apresenta um conjunto de elementos sobre o tema, coligidos de algumas das mais importantes publicações da especialidade.

Por se tratar de um tema, associado a um elevado grau de especificidade e complexidade, não são muitos os especialistas, que aprofundam a análise do choque hidráulico. Não obstante, existem algumas publicações de grande qualidade, sobre regimes transitórios. As referidas obras são, no entanto, especialmente dedicadas, a métodos matemáticos e de cálculo numérico, sobre os quais são feitas exposições, com um elevado grau de detalhe.

O objectivo que norteou toda a preparação desta dissertação, ao invés, passa, fundamentalmente, por proporcionar, a eventuais interessados, em iniciar-se nos estudos relacionados com o tema, o acesso a um conjunto de elementos simples e úteis. Para tal, incluiu-se a apresentação de conceitos básicos, sobre protecção de condutas elevatórias, contra o golpe de aríete, numa linguagem tão simples, quanto possível, e acompanhados por inúmeras figuras, para auxílio da sua compreensão.

Na presente dissertação, são considerados, essencialmente, casos de sistemas elevatórios, de reduzida complexidade. Esta opção permite, uma descrição mais adequada e simples de entender, dos princípios de funcionamento, dos dispositivos mais comuns de protecção, contra os efeitos dos regimes transitórios.

Assim, em termos de organização da dissertação, na sequência deste capítulo introdutório, é feito um enquadramento teórico fundamental, sobre os regimes de escoamento em pressão (Capítulo 2), ao qual se segue uma abordagem mais profunda, dedicada exclusivamente aos regimes transitórios (Capítulo 3). Nesta abordagem, são tratados temas como, as principais condições de risco, consequências e as causas dos regimes transitórios, e a análise qualitativa e teórica do golpe de aríete, terminando com uma breve descrição dos métodos gerais de análise matemática do fenómeno. O Capítulo 4, é dedicado à apresentação de algumas bases essenciais para a análise preliminar do choque hidráulico, em sistemas elevatórios. Segue-lhe o Capítulo 5, onde é feita uma descrição detalhada, das técnicas mais comuns, para atenuar as variações máximas de pressão, verificadas em sistemas elevatórios, na sequência de regimes transitórios. Ainda no mesmo capítulo, é apresentado um conjunto de critérios, de apoio à decisão, na selecção do sistemas de protecção, a adoptar, de acordo com algumas situações padrão. No Capítulo 6, é demonstrado um exemplo prático, de cálculo aproximado, do golpe de aríete, num sistema elevatório. Neste exemplo, são determinadas as envolventes máximas e mínima de pressão, associadas a uma situação de paragem súbita, dos grupos de um sistema elevatório. O exercício anterior, é acompanhado por uma apresentação detalhada, de um método expedito, para pré-dimensionamento de um dispositivo de protecção, contra o golpe de aríete.

2. ESCOAMENTOS EM PRESSÃO. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Numa perspectiva simplista, considera-se que as características de escoamento num sistema elevatório, se mantêm independentes do tempo, em cada secção da conduta, ou seja, o seu funcionamento processa-se segundo um regime permanente. Este regime, é caracterizado por um equilíbrio, resultante da compatibilidade entre as características hidráulicas dos componentes do sistema, e os valores da carga hidráulica, ou da cota piezométrica, impostos em cada secção limítrofe do mesmo (Almeida, 1990).

Ao regime em que são verificadas alterações significativas, nas condições de funcionamento de uma conduta elevatória, em particular na pressão e no caudal, chama-se variável.

Tipicamente, um regime variável é pautado por uma curta duração de tempo, em que esse período é limitado por dois regimes permanentes, nas fases inicial e final, sendo-lhe atribuída, por tal razão, a designação de regime transitório.

A Figura 2.1 representa a passagem de um regime permanente para outro regime permanente. A situação ilustrada pode, por exemplo, corresponder ao funcionamento de um sistema elevatório provido de dois grupos electrobomba, onde o regime permanente 1 corresponde ao funcionamento, exclusivamente, de um grupo, e o regime permanente 2 representa o funcionamento, em simultâneo, dos dois grupos. Na transição entre os dois regimes permanentes, ocorre um variável.
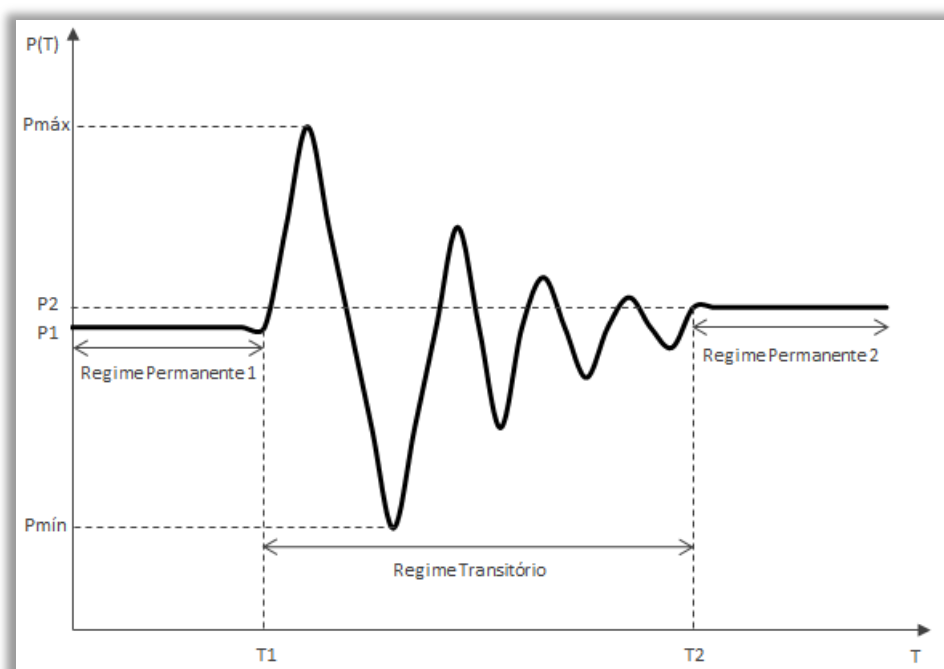
Figura 2.1. Passagem entre dois regimes permanentes

A classificação dos regimes transitórios em pressão, é concebida, tendo em conta o comportamento dinâmico das colunas líquidas em pressão, segundo três situações: regimes transitórios pseudo-permanentes, regimes gradualmente transitórios de tipo rígido ou oscilação em massa, ou regimes rapidamente transitórios ou de tipo golpe de aríete.

A forma gradual como se processam as alterações nas condições de exploração de um sistema, e a não verificação de efeitos elásticos de compressibilidade e deformabilidade, são características partilhadas pelos dois primeiros regimes transitórios em pressão. Numa situação de "oscilação em massa", ao contrário do que acontece num regime pseudo-permanente, já são verificadas algumas variações de pressão mais fortes, resultantes da influência das forças de inércia das colunas líquidas, e devido a um atraso, mais perceptível, no estabelecimento das novas condições de compatibilidade interna (Almeida, 1990).

As designações choque hidráulico ou golpe de aríete são, correntemente, utilizadas para qualificar os regimes transitórios, que resultam na alteração das propriedades elásticas da conduta e do líquido, quando as variações de pressão registam maior intensidade e violência. Neste caso, é notório o atraso no estabelecimento das condições de equilíbrio hidráulico no sistema.

Na origem dos termos choque hidráulico e, principalmente, golpe de aríete, está a semelhança entre os ruídos que, normalmente, acompanham a ocorrência deste fenómeno nas condutas, e os sons gerados por uma máquina de guerra medieval, o aríete, utilizada para destruir portões e muralhas de castelos.

Na Figura 2.2 apresenta-se um exemplo de um aríete, constituído por um tronco de madeira, com uma das extremidades provida, geralmente, com uma cabeça de carneiro fabricada em metal, impulsionado para embater nas estruturas a desmoronar.
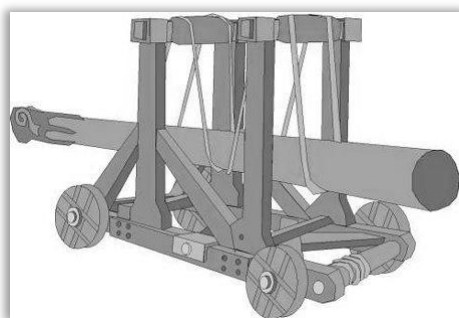
Figura 2.2. Aríete utilizado em guerras no período medieval (Mori, 2011)

As perturbações do escoamento no interior de uma conduta, que estão na base das referidas variações de caudal e de pressão, podem ser de natureza acidental ou resultar da normal exploração da respectiva instalação hidráulica. Nos casos mais comuns, são provocadas pela operação de fecho ou abertura de válvulas, por interrupção no fornecimento de energia eléctrica ao motor do grupo

electrobomba, com consequente paragem súbita deste, ou por falha mecânica dos dispositivos de protecção ou controlo.

Em sistemas hidráulicos, como é o caso de condutas elevatórias, as condições inerentes ao choque hidráulico, constituem um risco incontornável de ocorrência de acidentes. Deste modo, em projecto de condutas, torna-se imprescindível uma análise rigorosa do fenómeno, para adoptar medidas de prevenção contra os seus efeitos, como são exemplo, a rotura da conduta por sobrepressão, o seu colapso ou avarias nas bombas, entre outros.

Da mesma forma, a ausência de um conhecimento absoluto, no domínio dos efeitos do golpe de aríete, exige um estudo mais pormenorizado, de forma a auxiliar o processo de selecção de características mais adequadas para uma conduta, evitando paredes demasiado finas e, como tal, estruturalmente débeis ou, por outro lado, demasiado espessas e excessivamente dispendiosas.

3. REGIMES TRANSITÓRIOS EM PRESSÃO. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

3.1. CONDIÇÕES DE RISCO E POTENCIAIS CONSEQUÊNCIAS

Durante a operação de circuitos hidráulicos, podem ocorrer variações de pressão, não apenas, em situações, de certa forma, controladas por projectistas e técnicos de exploração, mas também em circunstâncias imprevisíveis e inesperadas. Um exemplo simples do primeiro caso, é a variação de pressão diária, que se verifica numa rede de distribuição de água, em função das necessidades de consumo. Uma circunstância inesperada resulta, por exemplo, da dificuldade em prever e controlar uma falha no fornecimento de energia eléctrica, ao motor de uma bomba hidráulica. Os movimentos variáveis, inerentes a situações imprevisíveis, não devem ser menosprezados, sendo importante proceder a uma análise de risco de ocorrência de condições intoleráveis, tal como as que se indicam na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Condições inaceitáveis em escoamentos em pressão e riscos associados (Adaptado de Thorley, 2004)

CONDIÇÕES INACEITÁVEIS	POTENCIAIS CONSEQUÊNCIAS
Pressões muito elevadas (superiores à pressão máxima de serviço admitida por uma conduta, equipamento ou acessório)	Deformação permanente ou rotura de condutas e elementos acessórios; danos nas juntas, selagens e maciços de amarração; derrames para o exterior da tubagem, originando desperdício, poluição ambiental e risco de incêndio.
Pressões muito baixas (inferiores à tensão de vapor do liquido escoado)	Colapso de condutas; infiltrações nas condutas, através de juntas e selagens expostas a pressões inferiores à atmosférica; contaminação do fluido bombeado; risco de incêndio nos casos de transporte de determinados fluídos.
Inversão do sentido de escoamento	Danos nas bombas e extravasamento de tanques e reservatórios
Deslocamento de condutas e vibração	Danos em estruturas de suporte de condutas e na própria tubagem; danos em equipamento e estruturas adjacentes.
Velocidades de escoamento demasiado baixas (inferiores a 0,30 m/s)	Sedimentação de sólidos e entupimento de circuitos (principalmente em transporte de lamas)

Nas figuras seguintes, podem ser observadas algumas das consequências indicadas na Tabela 3.1, verificadas em casos reais, após a ocorrência de condições inaceitáveis, em regimes transitórios em pressão.

Na Figura 3.1, é apresentada uma válvula de retenção DN800, destruída pelos efeitos do golpe de aríete, numa conduta elevatória, em particular devido à ocorrência de pressões de intensidade muito elevada (sobrepressões).
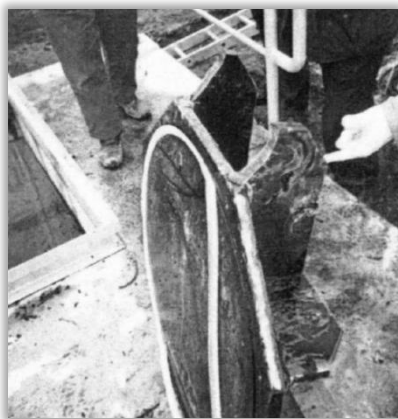
Figura 3.1. Válvula de retenção DN800 destruída devido a sobrepressão (KSB, 2008)

Por sua vez, a Figura 3.2 retracta uma conduta elevatória colapsada, devido aos efeitos de pressões muito baixas (depressões).

Figura 3.2. Conduta elevatória colapsada devido a depressão (Chaudhry, 1987)

Outra das condições inaceitáveis em escoamentos em pressão, mencionada por Thorley (2004) e transcritas na Tabela 3.1 é o deslocamento de condutas e vibração. Um exemplo da verificação desta

condição de risco, pode ser observado na Figura 3.3, onde uma conduta, devido aos efeitos dos regimes transitórios, se deslocou, danificando as estruturas de apoio, acabando por cair e ficar destruída também.

Figura 3.3. Efeitos da vibração e deslocação numa conduta elevatória DN600 (KSB, 2008)

No capítulo seguinte são indicadas algumas das possíveis causas, associadas às condições apresentadas no Tabela 3.1.

3.2. PRINCIPAIS CAUSAS DA OCORRÊNCIA DE CONDIÇÕES DE RISCO

Como referido anteriormente, as condições transitórias num escoamento, ocorrem sempre que se verifica uma perturbação das condições inerentes a um regime permanente.

Záruba (1993), descreve, com algum detalhe, algumas das causas mais comuns, associadas à ocorrência de regimes transitórios. Seguidamente resume-se, a exposição apresentada pelo referido autor.

Manobra de Válvulas em Condutas

Considere-se uma instalação constituída por um reservatório a montante, uma conduta e uma válvula de seccionamento a jusante. O caudal que escoa na conduta, varia, à medida que se manobra a válvula. Esta variação de caudal, origina o fenómeno do golpe de aríete. Caso a manobra da válvula, não se processe de uma forma controlada e adequada, as variações máximas de pressão, ocorrem na fase final do fecho da mesma.

Numa rede de condutas de distribuição de água, alimentada por um reservatório, a simples variação de caudal transportado na rede, provocada pela abertura e fecho de torneiras, é geradora de regimes transitórios.

Paragem Súbita de Bombas em Sistemas Elevatórios

Considere-se um sistema constituído por um reservatório de aspiração e uma bomba que possibilita a alimentação de um reservatório mais elevado a jusante, através de uma conduta elevatória. Na secção da conduta a jusante da bomba, está instalada uma válvula de retenção que impede o escoamento no sentido contrário ao forçado pela bomba. Após a saída de serviço da bomba, o escoamento continua a processar-se, por instantes, em direcção ao reservatório de jusante. Tal acontece devido à inércia própria do líquido transportado. Com a anulação do caudal à saída da bomba, a pressão na conduta, baixa rapidamente e a válvula de retenção fecha. Numa fase posterior, a coluna líquida na conduta elevatória pára e inverte o sentido do movimento, deslocando-se do reservatório de jusante em direcção à bomba. Quando a coluna líquida atingir a válvula de retenção com o obturador fechado, sofre uma desaceleração e, um subsequente aumento de pressão, gerando-se uma onda de sobrepressão. Dependendo da amplitude da onda de sobrepressão, a conduta e restantes componentes do sistema elevatório podem ser destruídos.

Uma situação ainda mais perigosa pode acontecer, caso a válvula de retenção não evite o escoamento em sentido contrário de forma atempada. A coluna líquida, deslocando-se do reservatório de jusante, em direcção à bomba, pode, nesse caso, atingir velocidades de escoamento muito elevadas. Quando, finalmente, acontecer o fecho da válvula de retenção, a violência da colisão e consequente desaceleração da massa líquida, serão geradores de valores de sobrepressão máxima ainda maiores.

Manobras em Sistemas de Turbinas

Quando, por exemplo, um gerador de uma turbina é desligado, a velocidade desta começa a aumentar de forma descontrolada. Como consequência, o sistema de controlo automático da turbina, cessa o escoamento no sentido desta, originando um regime transitório, do tipo golpe de aríete, na tubagem de alimentação da turbina.

Uma eventual deficiência mecânica da turbina, que provoque a vibração das pás da mesma, constituirá um factor gerador deste tipo de fenómenos.

Ar Sob a Forma Livre em Condutas

A entrada de ar numa tubagem, é outra causa frequente dos regimes transitórios, do tipo golpe de aríete, podendo provocar a rotura da veia líquida. A colisão das frentes das duas colunas de massa líquida, anteriormente separadas, provoca, normalmente, sobrepressões muito elevadas.

Em certas situações, a entrada de ar numa conduta, pode atenuar o efeito do golpe de aríete, como se justificará posteriormente.

Sólidos em Condutas

A existência de partículas sólidas, no interior de uma conduta, também pode estar, directamente, na origem de fenómenos de golpe de ariete, através da obstrução súbita de uma determinada zona da mesma.

As partículas sólidas também podem influenciar, de forma desfavorável, os efeitos do golpe de aríete provocado por outras situações. Estas partículas, podem aumentar a densidade da mistura, no escoamento, reduzindo, desta forma, a sua compressibilidade, o que se traduzirá no agravamento dos efeitos dos regimes transitórios.

Por outro lado, a acumulação de sólidos numa conduta, irá provocar uma redução da secção de escoamento, conduzindo a um aumento da velocidade para o mesmo caudal, de onde resultará um aumento da magnitude da variação de pressão, inerente ao regime transitório.

Outras Causas

Os regimes transitórios não ocorrem apenas em escoamento em pressão, verificando-se também nos escoamentos em superfície livre.

A título de curiosidade, referem-se alguns mecanismos, que estarão na origem de regimes transitórios em superfície livre, como as alterações bruscas de caudal escoado num canal, devido a abertura ou fecho de comportas; a falha ou colapso de uma barragem, ou, por exemplo, o aumento brusco de caudal afluente a um rio, ou a uma rede de esgotos, devido à ocorrência de uma tempestade, com elevada precipitação (Chaudhry, 1987).

3.3. GOLPE DE ARÍETE. ANÁLISE QUALITATIVA

3.3.1. MECANISMO DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE PRESSÃO

Considere-se o caso ilustrado na Figura 3.4, relativo à propagação das ondas de pressão, após fecho de uma válvula, localizada entre condutas que estabelecem a ligação entre dois reservatórios. Durante o regime permanente, o escoamento processa-se, como indicado na alínea (a) da figura, ou seja, da esquerda para a direita. Para simplificar a análise da sequência de acontecimentos, que se verificam após o fecho da válvula, assumiram-se as seguintes condições:

- O fecho da válvula ocorre de forma instantânea;
- O nível nos reservatórios a montante e a jusante mantem-se constante;
- Durante o regime permanente, que antecede o regime variável, o caudal é constante em toda a extensão das condutas entre os reservatórios;
- Consideram-se nulas as perdas de carga, pelo que a linha piezométrica é assinalada como um segmento de recta horizontal;
- A extensão da tubagem entre o reservatório à esquerda (montante) e a válvula, e entre esta e o reservatório à direita (jusante), é igual;

- A velocidade, c, de propagação de ondas de pressão, é constante, e igual em ambos os troços de tubagem;
- As linhas de pressão, mantêm-se sempre acima da pressão de vapor.

Escolheu-se este exemplo, por permitir, de certa forma, ilustrar em simultâneo, os dois casos mais comuns apresentados em livros da especialidade, que se explicam em seguida.

O primeiro caso, pressupõe o fecho instantâneo de uma válvula, instalada na extremidade de jusante de uma conduta adutora, alimentada a partir de um reservatório mais elevado, a montante (situação ilustrada pelo conjunto de elementos apresentados no lado esquerdo da Figura 3.4, com a sequência, reservatório-conduta-válvula);

O segundo caso, compreende a paragem subida de uma bomba, que alimenta um reservatório a jusante, através de uma conduta forçada (ilustrada pelo conjunto de elementos situados no lado direito da Figura 3.4, com a sequência válvula-conduta-reservatório). Para execução deste exercício, deve imaginar-se que, no lugar da válvula, estaria uma bomba, que forneceria uma pressão ao escoamento, idêntica à pressão do reservatório à direita. Neste caso, o fecho instantâneo da válvula, corresponderia à paragem brusca da bomba.

Como foi referido, o sistema apresentado na alínea (a) da Figura 3.4, determina que o reservatório à esquerda representa o reservatório de montante, processando-se o escoamento no sentido do reservatório à direita (jusante), numa situação de funcionamento normal, com a válvula aberta.
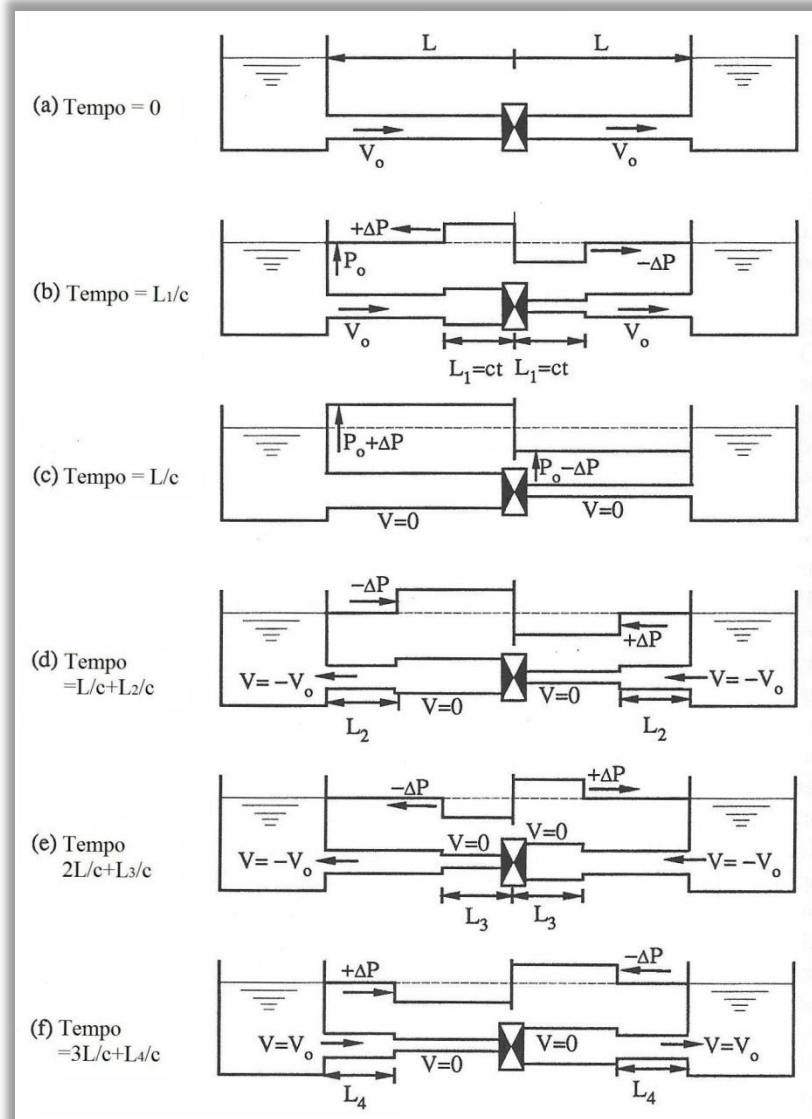
Figura 3.4. Análise qualitativa do golpe de aríete (Adaptado de Swaffield e Boldy, 1993)

No instante em que se verifica o fecho da válvula, interrompe-se imediatamente o escoamento e, a coluna de líquido junto à válvula, entra numa situação de repouso, sendo transportada esta informação ao longo de cada troço de tubagem, a uma velocidade c. Após um período de tempo t, a situação que se verifica está representada na alínea (b) da Figura 3.4, onde a frente das ondas de pressão, se moveram, numa extensão igual a $L_1 = ct$, ao longo de cada troço de tubagem.

As ondas de pressão chegam aos respectivos reservatórios na extremidade das condutas, após o fecho imediato da válvula, no instante $t = L/c$ (alínea (c) da Figura 3.4). Nesta altura verifica-se uma situação de desequilíbrio, onde o líquido, na fronteira conduta-reservatório, se encontra a uma pressão diferente da pressão no reservatório. Uma vez que não será possível suportar esta diferença de pressões, terá início um escoamento, que tenderá a reestabelecer o equilíbrio, ou a compatibilidade da pressão, na fronteira. Ondas de pressão de intensidade igual, à verificada, antes

do fecho da válvula são então propagadas, no instante $t = L/c$, no sentido contrário, ou seja, com origem em cada um dos reservatórios, em direcção à válvula fechada. No caso do reservatório de montante, a onda de pressão é negativa, enquanto a onda de pressão, com origem no reservatório de jusante, é positiva.

Na conduta de montante, a onda de pressão faz-se acompanhar do escoamento de caudal da conduta para o reservatório, enquanto a frente da onda na tubagem estiver a uma pressão superior à registada no reservatório. Tendo em consideração, que se assumiu, que as perdas de carga são nulas, a velocidade de escoamento do caudal, é idêntica à verificada durante o regime permanente, tal como indicado na alínea (c) da Figura 3.4.

A justificação anterior também se aplica ao escoamento verificado, do reservatório de jusante para a conduta, e ao facto da velocidade com que se processa, ser idêntica, à verificada, antes do fecho da válvula, mas com sentido oposto (alínea (c) da Figura 3.4).

Na tubagem de montante, a onda de compatibilização de pressão, chega à válvula fechada no instante $2L/c$. Neste instante, a pressão, em toda a extensão da tubagem, entre o reservatório de montante e a válvula fechada, é idêntica à pressão registada, antes do fecho da válvula, e prepara-se o início do escoamento, da conduta para o reservatório de montante.

No instante em que a onda atinge a válvula fechada, já não existe líquido em frente da mesma, para suster o escoamento, que se inicia no sentido do reservatório de montante, razão pela qual, se forma uma zona de baixa pressão, junto à face de montante da válvula. O escoamento na válvula regista uma velocidade nula, e é gerada uma onda de depressão, que se propaga no sentido conduta-reservatório de montante, anulando o caudal escoado na conduta, à medida que se desloca, tal como representado na alínea (e) da Figura 3.4.

Desta forma, a intensidade das ondas que agora se propagam em direcção ao reservatório de montante, é idêntica à magnitude das ondas que se propagaram inicialmente ($+/-\Delta p$), quando se procedeu ao fecho da válvula, uma vez que estão a ser desprezados os efeitos do atrito. A onda de pressão, que se desloca no sentido do reservatório de montante, tem uma intensidade $-\Delta p$ e provocará uma redução da pressão, em toda a extensão da conduta, para um valor Δp abaixo da linha de pressão, característica do regime permanente (antes do fecho da válvula).

Swaffield e Boldy (1993), na análise da figura em causa, salientam um aspecto interessante, relativamente à variação total, instantânea da pressão, na face de montante da válvula fechada, no instante $2L/c$, uma vez que esta tem uma intensidade $-2\Delta p$. Tal deve-se, à simultaneidade, com que se processam, a chegada da onda de intensidade $-\Delta p$ do reservatório de montante, e a reflexão imediata da onda, na válvula fechada, com intensidade $-\Delta p$, no sentido contrário, ou seja, em direcção ao reservatório de montante.

O estabelecimento de uma linha de pressão, $-\Delta p$, abaixo da linha de pressão, em regime permanente, está completo no instante $3L/c$, quando a onda reflectida na válvula fechada, no instante $2L/c$, alcança o reservatório de montante.

De forma análoga, a onda de reequilíbrio, com origem no reservatório de jusante, determina o início do escoamento no sentido inverso, em direcção à face de jusante da válvula fechada, onde chega no instante $2L/c$. Uma vez que a válvula se encontra fechada, o escoamento anula-se e gera-se uma onda de pressão, de intensidade $+\Delta p$, na face de jusante da mesma. Esta onda propaga-se para jusante, em direcção ao reservatório, anulando o escoamento no sentido inverso, que se processava nesta conduta, e provocando um aumento da pressão para $+\Delta p$, acima da linha de pressão, em regime permanente. Esta onda atinge o reservatório de jusante, no instante $3L/c$, e, nesta altura, o líquido no interior da conduta a jusante da válvula, encontram-se em repouso, em toda a sua extensão.

Assim, no instante $3L/c$, voltam a verificar-se condições de desequilíbrio, semelhantes às registadas no instante L/c, nas fronteiras conduta-reservatório, a montante e a jusante, mas agora é na conduta de montante que a pressão é inferior à pressão no reservatório e é na conduta de jusante que a pressão é superior à pressão do reservatório. Em qualquer uma das situações o escoamento nas condutas é nulo.

Contudo, os mecanismos que desencadeiam a propagação de ondas de pressão, são idênticos aos descritos para o instante L/c, e, consequentemente, duas novas ondas de reequilíbrio são geradas. No caso da conduta de montante, a onda de pressão assume uma magnitude $+\Delta p$, e desloca-se no sentido da válvula fechada, repondo os valores da linha de pressão e da velocidade de escoamento, para os valores iniciais, antes do fecho da válvula.

Um processo semelhante, origina a propagação de uma onda de pressão de intensidade $-\Delta p$, com origem no reservatório de jusante, em direcção à válvula fechada, reestabelecendo a linha de pressão e velocidade de escoamento, para valores iguais, aos verificados durante o regime permanente.

Estas ondas de compatibilização chegam à válvula fechada, no instante $4L/c$ e, nesta altura, as condições do sistema são idênticas às iniciais, antes do fecho da válvula, com excepção da posição da válvula, que permanece fechada, impedindo que os escoamentos prossigam. Assim, todo o ciclo descrito antes, e apresentado na Figura 3.4, repetir-se-á indefinidamente, por períodos de tempo bem definidos, e iguais a $4L/c$.

De uma forma geral, a análise dos regimes transitórios, é feita com base no período de tempo, que decorre, entre o deslocamento de uma onda de pressão, desde a origem da perturbação do escoamento, à chegada ao ponto de fronteira, onde acontece a reflecção, e regresso ao ponto de partida. No caso apresentado, para cada uma das condutas, o período que decorre, entre a partida

das ondas de pressão da válvula fechada, a chegada aos respectivos reservatórios, onde são reflectidas, e o regresso à válvula, é igual a $2L/c$.

Através da leitura dos diagramas, apresentados na Figura 3.5, pode-se inferir a pressão ao longo do tempo, e em várias secções de cada uma das condutas. Estas variações, são obtidas com base na determinação do instante, em que qualquer uma das ondas de pressão $+/- \Delta p$, chega ao ponto de referência na conduta.
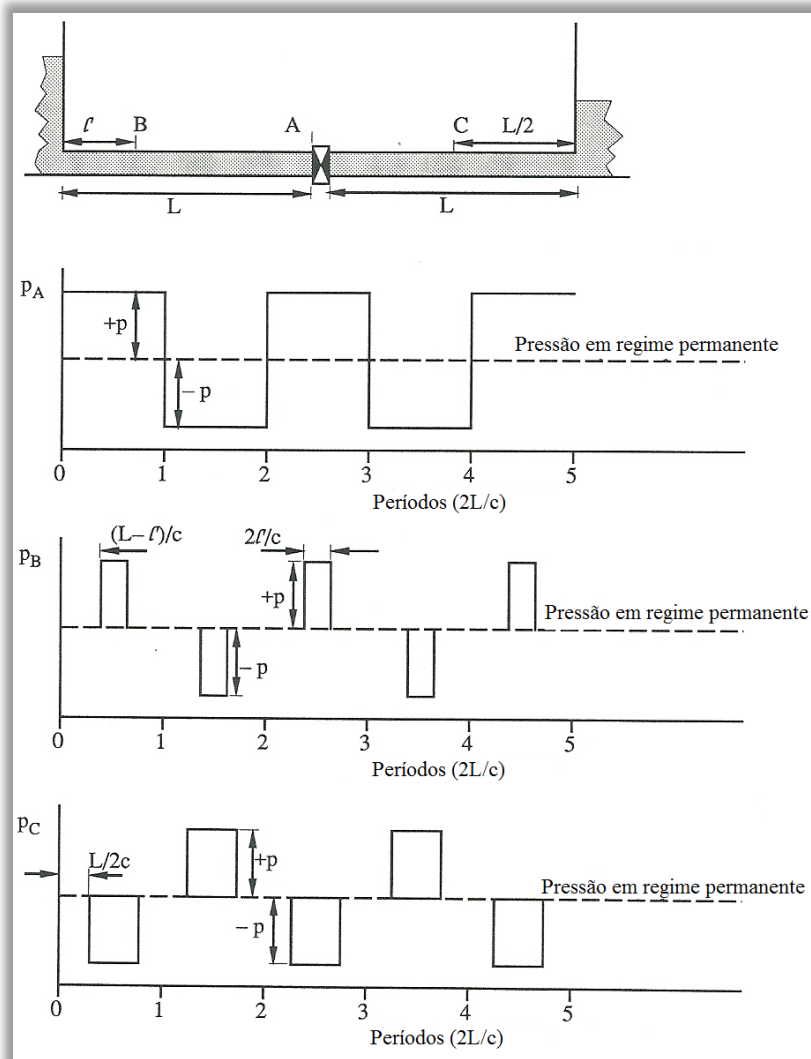
Figura 3.5. Diagrama de pressões ao longo das duas condutas idênticas que ligam os reservatórios, após o fecho instantâneo da válvula (Adaptado de Swaffield e Boldy, 1993)

Na realidade, a repetição indefinida dos ciclos descritos anteriormente, não se verifica, uma vez que as perdas de carga, terão um efeito de amortecimento nas ondas de pressão.

Na Figura 3.6, apresenta-se um diagrama de pressões, idêntico ao da figura anterior, mas considerando uma bomba na posição da válvula, e para uma situação de paragem instantânea da

mesma (passagem imediata de uma condição de caudal correspondente ao regime permanente, para um caudal nulo na secção da bomba).
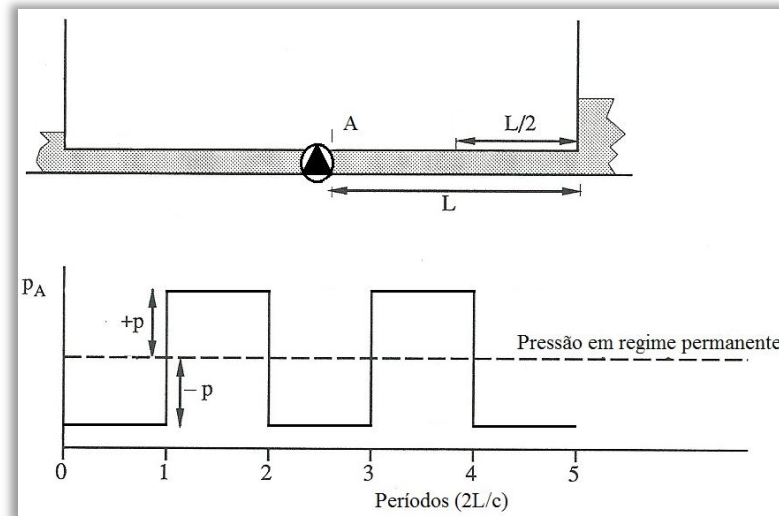
Figura 3.6. Diagrama de pressões na secção da bomba, após paragem instantânea da mesma (Adaptado de Swaffield e Boldy, 1993)

Para uma situação de arranque instantâneo da bomba (passagem de uma condição de caudal igual a zero, para um caudal correspondente ao regime permanente), o diagrama de pressões seria simétrico do apresentado na Figura 3.6.

3.3.2. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PARAGEM DE UMA BOMBA

Considerações Gerais

Uma das condições normais de operação, consideradas na fase de estudo preliminar do golpe de aríete, em sistemas elevatórios, é a interrupção súbita, do fornecimento de energia eléctrica ao motor da bomba, com subsequente paragem da mesma. Uma vez que representa a situação mais desfavorável, é admitido, na fase de análise em causa, que a paragem da bomba e, consequente anulação de caudal, ocorrem de forma instantânea.

Na realidade, o que acontece, após corte da alimentação do motor eléctrico, programado ou acidental, é a redução gradual do caudal escoado, fruto de uma paragem progressiva da bomba. Tal efeito, é provocado pela inércia das massas girantes, do grupo electrobomba e da água. Após anulação completa do caudal escoado, verifica-se o fecho de uma válvula de retenção, normalmente instalada a jusante da bomba, de forma a impedir o escoamento no sentido inverso, através da bomba.

Os factores que influenciam o tempo de paragem de uma bomba e, também, de anulação de caudal são as curvas características de funcionamento do grupo instalado, as condições hidráulicas da instalação e a inércia do grupo instalado (Quintela, 1979).

A análise que se segue, relativamente à influência do tempo de paragem de uma bomba, nas variações máximas de pressão, assenta no cenário seguinte:

- Tem-se um sistema, constituído por dois reservatórios, ligados através de uma conduta;
- O escoamento é forçado, por uma bomba instalada num ponto da conduta, junto ao reservatório de montante (nível de líquido inferior), para o reservatório de jusante (nível de líquido superior);
- Na secção a jusante da bomba está instalada uma válvula anti-retorno;
- Após paragem da bomba, admite-se que o caudal se anula, segundo uma sequência de manobras elementares, tão rápidas que possam ser consideradas instantâneas.

Análise Qualitativa da Influência do Tempo de Anulação de Caudal

Após paragem da bomba, a primeira manobra elementar de redução de caudal, provocará, junto da secção da mesma, uma diminuição de velocidade, que se irá traduzir numa depressão. Esta depressão será, naturalmente, inferior à depressão, correspondente à anulação instantânea da velocidade.

Cada uma das manobras elementares que se seguem, provocará uma depressão, na secção da bomba, e uma onda, que se propaga em direcção ao reservatório de jusante (Figura 3.7).
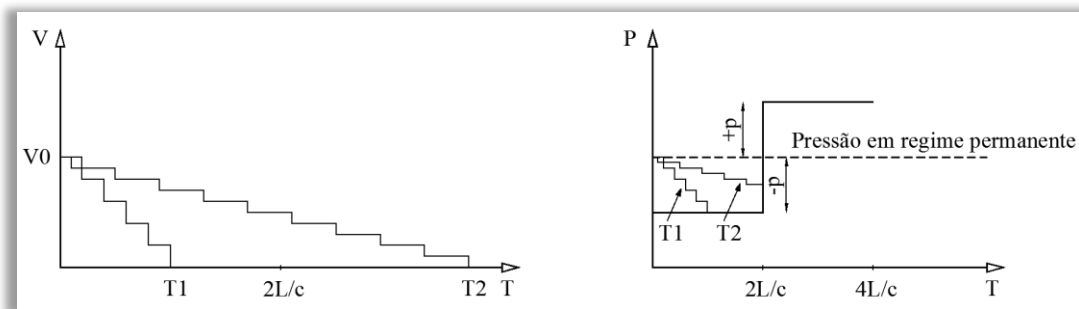
Figura 3.7. Diagrama de pressões junto de uma bomba após paragem instantânea ou não (Adaptado de Quintela, 1979)

A depressão na secção da bomba, num determinado instante, será a resultante das depressões, que até esse instante se originaram junto da bomba, em consequência das várias manobras elementares (e das sobrepressões, caso, entretanto, as ondas provocadas pelas primeiras manobras, tendo sido reflectidas no reservatório de jusante, já atingiram a bomba).

Desta forma, colocam-se duas situações distintas a ter em consideração:

- Uma, em que o tempo de anulação de caudal, T, é inferior ao tempo de propagação de uma onda, gerada na secção da bomba, até ao reservatório e o seu regresso ao ponto de partida ($2L/c$),
- Outra, em que o tempo, T, é superior a $2L/c$.

Quando o tempo de anulação de caudal, T, é inferior a $2L/c$, a depressão inerente à última manobra elementar de redução de caudal, ainda será adicionada, à depressão, devida à primeira manobra elementar. Neste caso, só se verificará uma sobrepressão, na secção da bomba, no instante $2L/c$, aqui considerado superior a T. Assim, a depressão máxima, atingida na secção da bomba, será idêntica, à registada, na hipótese de anulação instantânea de caudal.

Por outro lado, se o tempo de anulação de caudal, T, é superior a $2L/c$, verifica-se, na secção da bomba, e após o instante $2L/c$, a sobreposição das depressões com as sobrepressões, reflectidas, a partir do reservatório, decorrentes das manobras iniciais. Desta sobreposição, resultará um efeito atenuante, na depressão máxima, verificada na secção da bomba. A atenuação, será tanto maior, quanto mais retardado for o tempo de anulação de caudal.

Apesar da igualdade, do valor máximo atingido, relativamente à amplitude das depressões, verificada nas situações, em que o tempo de anulação de caudal, é instantâneo, ou inferior, ao tempo de ida e retorno de uma onda de pressão ($2L/c$), a sua distribuição ao longo da conduta, não se processará, de modo uniforme, como se pode verificar na Figura 3.8.
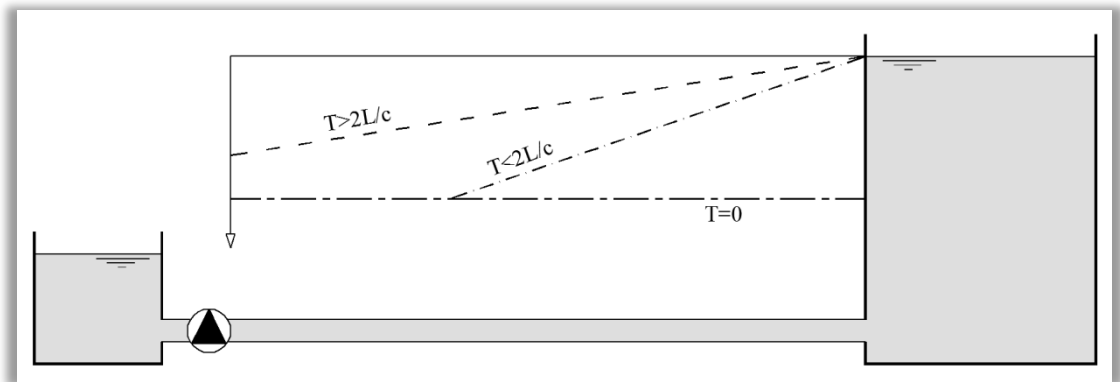
Figura 3.8. Diagrama de pressões mínimas ao longo de uma conduta elevatória, após paragem da bomba (Adaptado de Quintela, 1979)

A depressão máxima, só será igual, nas secções da conduta, em que se verifiquem, exclusivamente, sobreposição de depressões, geradas pelo conjunto de manobras elementares.

Deste modo, existe uma secção limite, à qual chegam, simultaneamente, a onda de depressão, proveniente da bomba, e respeitante à última manobra, e a onda de sobrepressão, que resulta da

reflexão, no reservatório, da onda provocada pela primeira manobra. A distância, medida na horizontal, contada, a partir da secção da bomba, até esta secção, é obtida pela expressão seguinte:

$$\frac{x}{c} = \frac{L}{c} - \frac{T}{2} \quad (3.1)$$

A redução, de forma linear, da depressão máxima, a partir desta secção da conduta, até à secção do reservatório, onde se anula, é um procedimento simplificado, que, normalmente se utiliza. Nos casos em que, o tempo de ida e retorno da onda de pressão, gerada pela primeira manobra elementar, iguala o tempo de anulação de caudal, a depressão máxima, faz-se sentir na secção da bomba. A partir deste ponto, a depressão máxima, vai diminuindo, linearmente, até ao reservatório (Figura 3.8).

A análise efectuada, permite a dedução de dois importantes mecanismos, de redução da amplitude, das ondas de pressão, associadas à ocorrência de regimes transitórios:

- O aumento do tempo de anulação de caudal, que pode ser conseguido, com a instalação de um volante de inércia, no veio de uma bomba;
- A redução do comprimento da conduta, entre a bomba e o reservatório, efeito que se pode obter, recorrendo à instalação de uma chaminé de equilíbrio, ou de um reservatório de ar comprimido.

3.3.3. CAVITAÇÃO E ROTURA DA VEIA LÍQUIDA

Considere-se um sistema elevatório, com características semelhantes, às admitidas na análise anterior (dois reservatórios, ligados por uma conduta forçada, onde uma bomba está instalada, junto ao reservatório de montante).

Ao longo da análise conduzida até esta fase, considerou-se que a depressão máxima, gerada após paragem de uma bomba, não faria a respectiva pressão mínima baixar, até à tensão de vapor de água.

No entanto, admitindo que não é possível, o estabelecimento de esforços de tracção na água, o cumprimento das condições de compatibilidade, tal como descritas nos subcapítulos anteriores, não é fisicamente possível. O valor da pressão mínima não pode ser, assim, teoricamente inferior ao zero absoluto. A libertação de gases dissolvidos, expansão de gases livres e vaporização da água, começam, na realidade, a verificar-se, para pressões, pouco superiores à pressão de saturação.

Assim, após a paragem de uma bomba, a coluna líquida a jusante desta, não ficaria em repouso, tal como descrito, havendo lugar a uma separação da mesma, formando-se uma cavidade ocupada por vapor de água e gases. Este fenómeno designa-se por rotura da veia líquida (Figura 3.9).
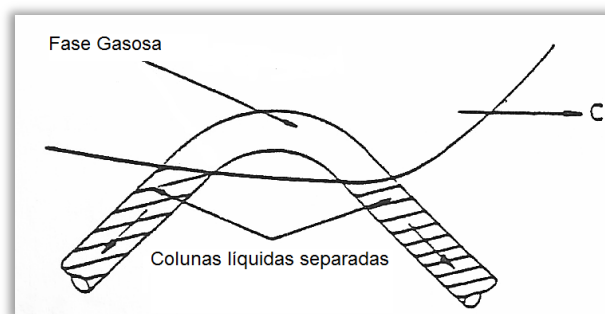
Figura 3.9. Rotura da coluna ou veia líquida (Adaptado de Almeida, 1991)

O grande problema da rotura da veia líquida, prende-se, com a possibilidade de se gerarem elevadas sobrepressões na fase posterior. Ao atingirem a zona onde ocorre a rotura da veia líquida, as ondas de sobrepressão reflectidas no reservatório de jusante, que se propagam em direcção à bomba, absorvem total ou parcialmente, o vapor e os gases libertados, o que provocará o colapso da cavidade, e consequente colisão da coluna líquida, contra a válvula de retenção, instalada a jusante da bomba.

Não é apenas junto à bomba, que a rotura da veia líquida poderá acontecer. O perfil longitudinal de uma conduta elevatória, também poderá constituir um risco de ocorrência, de pressões inferiores à pressão de saturação, em particular nos pontos altos. Neste caso, quando a onda de pressão, reflectida no reservatório, atinge a cavidade, provocando o seu colapso, devido à pressão elevada, a colisão ocorre, naturalmente, entre as duas fracções da coluna de água.

Os mecanismos de protecção de condutas elevatórias, contra os efeitos do golpe de aríete, têm, na sua maioria, por objectivos, a redução da depressão, de forma a não ser atingida a tensão de vapor do líquido, e/ou a redução da sobrepressão, inerente ao colapso da cavidade, originada pela rotura da veia líquida (Quintela, 1979).

A rotura completa da veia líquida pode, eventualmente, não acontecer, verificando-se apenas o aparecimento de um escoamento bolhoso, constituído por uma mistura de líquido e bolhas de ar e de outros gases, com propriedades ligeiramente diferentes das do líquido à pressão normal. A este fenómeno, chama-se cavitação bolhosa (Figura 3.10).
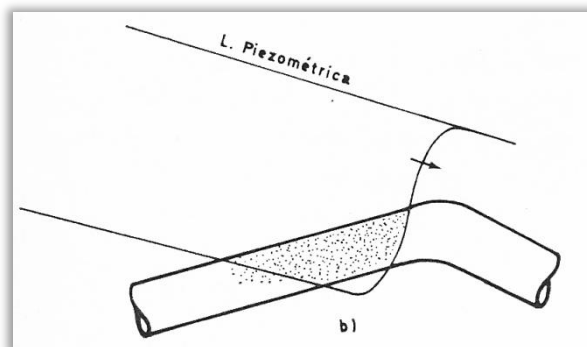
Figura 3.10. Escoamento bolhoso (Adaptado de Almeida, 1981)

Quando a parcela gasosa é significativa, e ocupa a zona superior da conduta, passando o escoamento a processar-se em superfície livre, diz-se que ocorre separação da veia líquida (Figura 3.11).
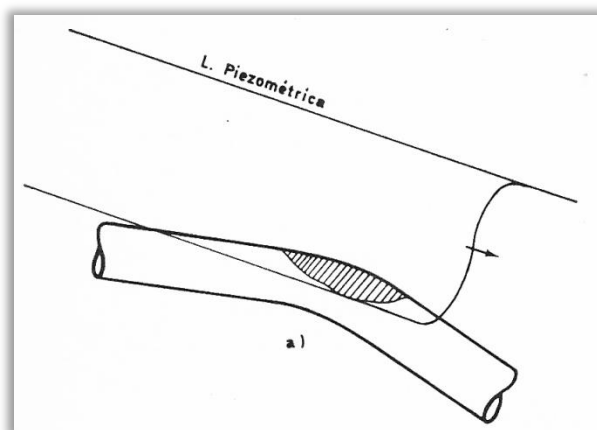
Figura 3.11. Separação da coluna ou veia líquida (Adaptado de Almeida, 1981)

3.3.4. ENTRADA DE AR E OUTROS GASES NAS CONDUTAS

A presença de ar e outros gases, numa conduta, dissolvidos ou livres, constitui um factor indicativo, relevante sobre o comportamento de um sistema elevatório, face às condições associadas à ocorrência de regimes transitórios. Contrariamente à rapidez, com que se se processa, a libertação de gases e vapor de água, quando a pressão baixa, a taxa a que os mesmos são absorvidos pela veia líquida, é tão reduzida, que pode ser ignorada (Thorley, 2004).

A reacção de um sistema, à presença, na forma livre, de ar e outros gases, depende da distribuição destes.

Quando o escoamento, numa conduta elevatória, se processa segundo velocidades reduzidas, há tendência para a agregação e formação de bolsas. Estas bolsas, poderão tornar-se pontos de reflecção de ondas de pressão, caso adquiram dimensões significativas.

Apenas nas situações, em que o escoamento se faz com velocidades moderadas, é que o ar se separa em pequenas bolhas, formando uma massa homogénea. Neste caso, mesmo para pequenas quantidades de bolhas existentes no escoamento, a celeridade das ondas elásticas pode ser reduzida, para um quarto da velocidade de propagação das mesmas, num líquido puro (Thorley, 2004).

A ocorrência de fenómenos de cavitação e rotura da veia líquida, constitui uma série de potenciais riscos, dos quais se destacam os seguintes (Almeida, 1991):

- Incorrecto funcionamento de alguns dispositivos, associados a um sistema elevatório;
- Deterioração do revestimento interno de uma conduta;
- Enfraquecimento estrutural de uma conduta, nas regiões de ocorrência de cavitação;
- Colapso por esmagamento, de uma conduta, por incapacidade de resistência à pressão externa;
- Ocorrência de sobrepressões muito elevadas, após colapso das cavidades preenchidas por vapor e gases, com consequente colisão de colunas líquidas, ou coluna líquida e válvula de retenção;
- Contaminação, por infiltração numa conduta, de água tratada.

No entanto, a cavitação e rotura da veia líquida, não representam apenas inconvenientes, uma vez que, devido à referida influência que têm na celeridade das ondas, poderão constituir uma vantagem, do ponto de vista económico, e em condutas de curta extensão, proporcionando a eventual dispensa de dispositivos especiais de protecção.

Lencastre (1996), enuncia uma série de factores, que podem estar na origem da existência de bolsas de ar, nas condutas:

- Entrada de ar, através de vórtices, nas tomadas das bombas;
- Entrada de ar, quer por ventosas, quer por câmaras de equilíbrio;
- Libertação gradual do ar dissolvido;
- Enchimento defeituoso da conduta, onde a extracção integral do ar não foi garantida.

Na Figura 3.12, pode-se observar um vórtice gerado na tomada de uma bomba, provocando a entrada de ar num sistema elevatório. Esta situação poderá ser prevenida, através da colocação de anteparas na soleira, sob a tomada da bomba, de forma a quebrar a formação do vórtice.
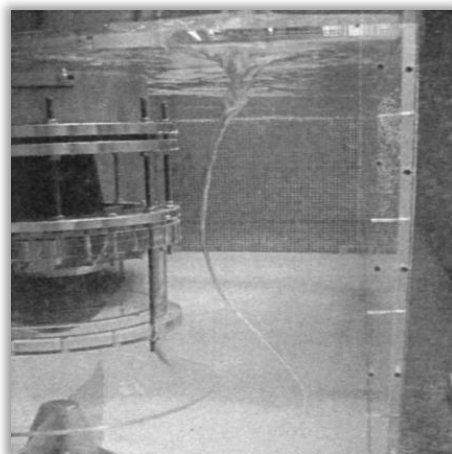
Figura 3.12. Vórtice gerado na tomada de uma bomba (KSB, 2008)

Uma outra situação ainda não referida, mas não menos comum em sistemas elevatórios, é o arrastamento de bolhas de ar, para a massa de água, contida nos respectivos poços de aspiração, promovido pela queda livre do caudal afluente aos mesmos. Estas bolhas de ar, apresentam uma baixa tendência de coalescência, e permanecem sob a forma livre durante muito tempo. Devido ao extenso período, necessário para que o ar seja absorvido pela água, as bolhas de ar acabam por ser aspiradas, e introduzidas no sistema, via tomada da bomba (Figura 3.13).
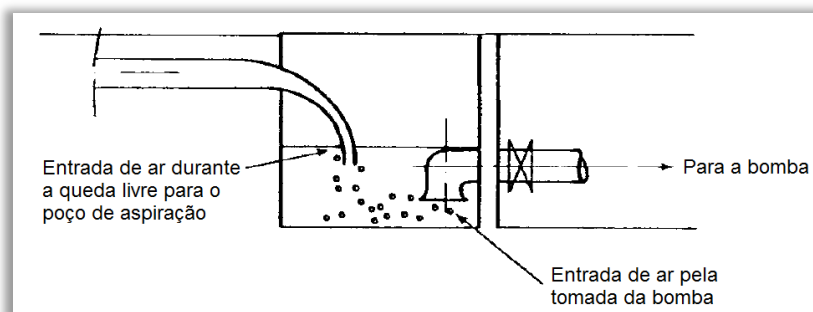
Figura 3.13. Queda livre para o poço de aspiração (Adaptado de Stephenson, 1989)

A instalação de uma chapa deflectora, a jusante do canal ou na tubagem de entrada no poço de aspiração, minimiza este problema.

O nível mínimo do líquido, na cuba de regularização de caudal, também representa um factor a ter em atenção, uma vez que se este for demasiado baixo, poderá permitir a aspiração de ar, conjuntamente com o líquido, para o sistema (Figura 3.14).
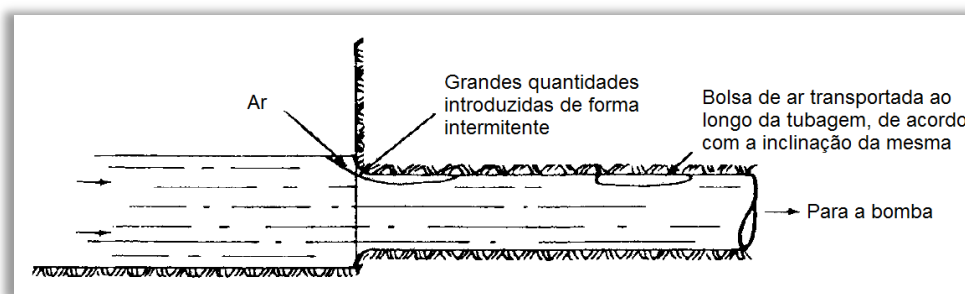
Figura 3.14. Nível mínimo de líquido no poço de aspiração (Adaptado de Stephenson, 1989)

3.4. OSCILAÇÃO EM MASSA. ANÁLISE QUALITATIVA

Considerações Gerais

O estudo do golpe de aríete, é feito de acordo com o modelo elástico, onde intervêm a compressibilidade do líquido e a deformabilidade da conduta. Por sua vez, para o estudo da oscilação em massa, adopta-se o modelo rígido, onde se considera o líquido incompressível, e a conduta indeformável.

Segundo o modelo rígido, os caudais num dado instante, em duas secções distintas de uma conduta elevatória, são sempre iguais, o que implica a propagação de qualquer perturbação de forma instantânea, ou seja, com uma velocidade infinita. Para as mesmas condições, de acordo com o modelo elástico, os caudais podem ser diferentes. No caso do modelo elástico, o caudal depende, da abcissa da secção da conduta e do tempo, enquanto no modelo rígido, o caudal depende unicamente do tempo.

O modelo da oscilação em massa, aplica-se, por exemplo, a um sistema onde a manobra de uma bomba, acontece de forma muito lenta, quando comparada com o tempo, que uma onda de pressão demora a percorrer, a distância, entre a bomba e o reservatório e a regressar à bomba, ou seja, L/c segundos (Wylie e Streeter, 1993).

Análise Qualitativa da Oscilação em Massa

Para auxiliar a análise do fenómeno em causa, considere-se a instalação da Figura 3.15, com uma chaminé de equilíbrio, intercalada numa conduta elevatória. A paragem da bomba, ocorre de forma instantânea, a partir de um regime permanente.

Admite-se a hipótese simplificadora de que, após a paragem instantânea da bomba, a coluna líquida, a montante da chaminé, se imobiliza instantaneamente, ou, então, ao fim de L/c (período muito curto).

Durante o regime permanente, que antecede a paragem da bomba, as cotas do líquido, na chaminé de equilíbrio e no reservatório, são iguais, uma vez que se admitem nulas, as perdas de carga no sistema, chaminé, conduta e reservatório, e desprezável, a altura cinética na conduta.
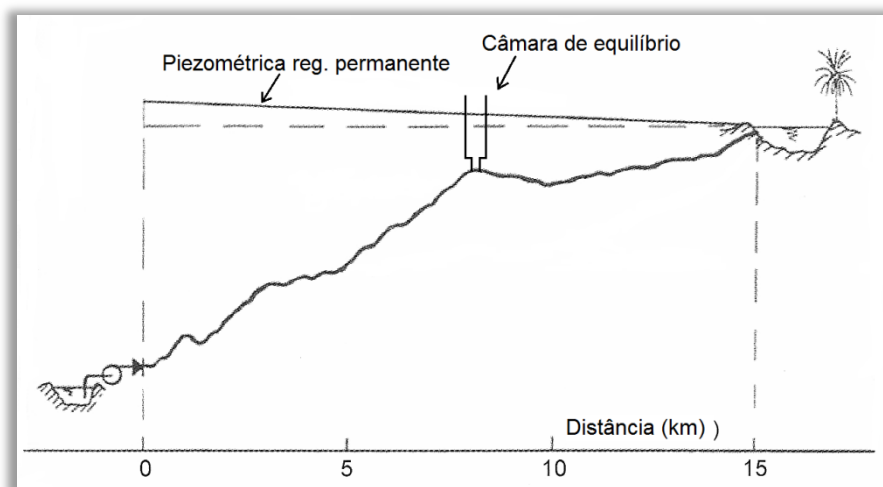
Figura 3.15. Instalação de bombagem com chaminé de equilíbrio intercalada na conduta elevatória (Adaptado de Thorley, 2004)

No sistema elevatório, apresentado na Figura 3.15, fracções de segundo após a paragem da bomba, ocorre a pressão mínima na secção da mesma, e a onda de pressão, propaga-se para jusante da bomba. No ponto alto da conduta (distância da bomba de 8 km), a pressão local não sofre alterações, devido ao nível de líquido no interior da chaminé, e a onda de pressão que chega, vinda da bomba, é reflectida na direcção à mesma, tal como aconteceria num reservatório de grandes dimensões e de nível constante, igual ao inicial.

Como referido anteriormente, admite-se que, a coluna líquida, na parcela da conduta a montante da chaminé, fica imobilizada, no entanto, na parcela da conduta, entre a chaminé e o reservatório, a coluna líquida continua a mover-se, no sentido do reservatório. Uma vez que deixou de haver escoamento, a partir da bomba, a alimentação da conduta, passou a processar-se, a partir da chaminé, à medida que, a pressão na conduta, vai diminuindo.

Como consequência da descida do nível de líquido na chaminé, a pressão na sua base, diminui, provocando, por sua vez, a desaceleração da coluna líquida, que se desloca, em direcção ao reservatório.

Quando se verifica a paragem da coluna líquida, então é atingido o nível mínimo, na chaminé de equilíbrio e, sendo inferior ao nível no reservatório, tem início uma inversão do sentido do escoamento, passando a processar-se do reservatório em direcção à chaminé, na qual o nível começa a subir. Este movimento é acelerado, até que se verifique a igualdade, entre os níveis no reservatório e na chaminé, sendo que, quando tal acontece, o escoamento na conduta, entre o reservatório e a chaminé, se fará, segundo uma velocidade igual, em módulo, à inicial.

Atingida a igualdade entre os níveis no reservatório e na chaminé, o movimento em direcção à chaminé é desacelerado e quando se dá a imobilização da coluna líquida, é atingido o nível máximo na chaminé, e tem início uma nova inversão, no sentido do movimento, que se repetirá de forma cíclica.

Desprezando os efeitos do atrito, toda a massa de líquido na conduta, entre o reservatório e a chaminé, tenderá a mover-se de forma harmónica, como se se movesse numa conduta em forma de "U" (Thorley, 2004).

Se, eventualmente, fossem consideradas as perdas de carga, então o movimento da coluna líquida seria amortecido. Nesse caso, o nível mínimo, atingido na chaminé, na sequência da paragem da bomba, seria superior ao verificado, quando são consideradas nulas as perdas de carga. Pelo contrário, o nível máximo na chaminé, considerando as perdas de carga na conduta, é inferior ao registado, quando estas se consideram nulas (Quintela, 1979).

A descrição do fenómeno de oscilação em massa, é feita com base em muitas simplificações. O próprio modelo elástico, também tem aplicação no estudo da oscilação em massa. Ainda assim, a oscilação em massa ou modelo rígido, nos casos em que é aplicável, constitui uma vantagem, porque as hipóteses simplificadoras, nas quais se baseia, tornam, bastante mais fácil, a sua utilização no cálculo, associado aos regimes transitórios.

3.5. ANÁLISE TEÓRICA DO GOLPE DE ARÍETE

No processo de análise, que se apresentará seguidamente, foram tomadas as seguintes hipóteses simplificadoras, válidas na quase totalidade dos casos de aplicação corrente (Almeida, 1981):

Relativamente ao comportamento do escoamento e do fluido:

- O escoamento é considerado unidimensional, sendo as equações válidas dum ponto de vista global. Nesta conformidade, admite-se, em cada secção da conduta e em cada instante, uma distribuição uniforme, para a pressão e para a velocidade;
- Os coeficientes correctivos de Coriolis, e de quantidade de movimento, consideram-se constantes e iguais à unidade;
- O fluido é homogéneo e monofásico, durante todo o regime variável;
- As condutas são consideradas perfeitamente impermeáveis, pelo que não existem trocas de caudal com o exterior, através das suas paredes laterais;
- As perdas de carga são iguais às que se verificariam, em cada instante, num regime uniforme tangente e permanente;
- A variação da massa volúmica do fluido, durante o regime variável, pode ser desprezada, face aos valores das variações de outras grandezas. Da mesma forma, não se têm em consideração, eventuais variações de temperatura, que ocorram durante o regime variável.

Relativamente ao comportamento da conduta:

- O eixo da conduta, apesar de esta estar submetida a solicitações dinâmicas, mantém-se imobilizado;
- A parede da conduta tem um comportamento elástico, caracterizado pelos respectivos módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, sendo, contudo, pouco deformável.
- Em cada troço elementar, a conduta é considerada como uniforme, sendo desprezadas as forças da inércia das suas paredes.

O processo de análise teórica do golpe de aríete, assenta na aplicação, a um troço elementar do escoamento, entre duas secções de uma conduta, dos princípios do equilíbrio dinâmico, e da conservação da matéria, podendo, de acordo com as hipóteses acima enunciadas, ser expresso pelas duas equações diferenciais seguintes (Chaudhry, 1987):

Equação da dinâmica:

$$\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\lambda}{2gD}V|V|=0 \quad \textbf{(3.2)}$$

A equação anterior, traduz o equilíbrio das forças, que actuam no troço elementar de escoamento, segundo o eixo da conduta, isto é, garante a 2ª Lei de Newton (Figura 3.16). Note-se que o termo $(\lambda/2gD)V|V|$, representa a perda de carga unitária, de acordo com a fórmula de Darcy.
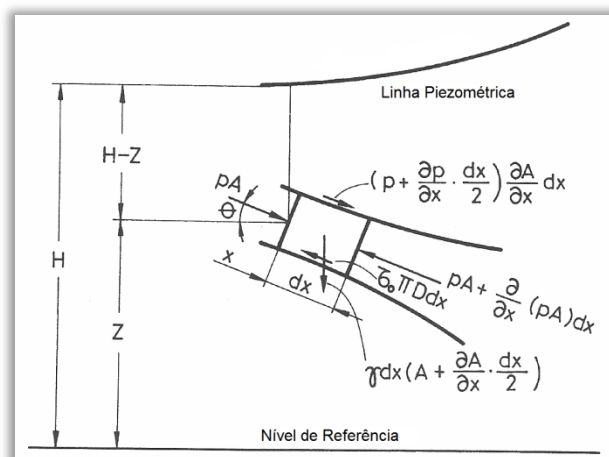
Figura 3.16. Forças actuantes num troço elementar do escoamento (Adaptado de Popescu et al., 2003)

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{c^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x}=0 \quad \textbf{(3.3)}$$

A equação da continuidade, exprime o princípio da conservação da massa do líquido, ou seja, a diferença, entre a quantidade de massa, que entra e sai pelas secções, que limitam o troço elementar, terá que ser igual à variação da massa existente no interior do referido troço, durante um dado intervalo de tempo.

De outra forma, a condição da continuidade, garante, que todo o espaço no troço de escoamento, entre duas secções da conduta, está preenchido com líquido, em qualquer instante (Figura 3.17).
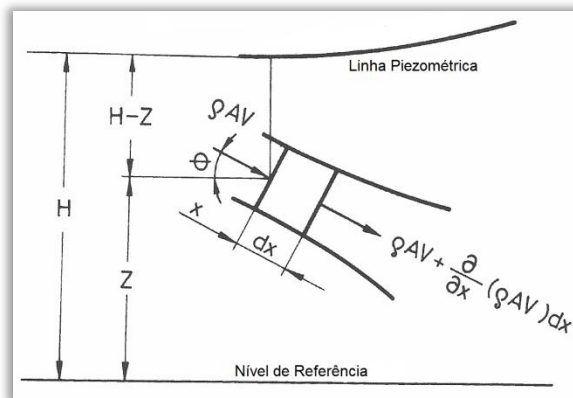
Figura 3.17. Fluxo de massa através de um troço elementar do escoamento (Adaptado de Popescu et al., 2003)

Considerando nulas as perdas de carga na conduta, o que, praticamente é admissível para a primeira onda de pressão, as equações de escoamento, podem ser escritas da forma seguinte:

Equação da dinâmica

$$\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}=0 \quad \textbf{(3.4)}$$

Equação de continuidade

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{c^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x}=0 \quad \textbf{(3.5)}$$

Derivando as duas equações anteriores, em ordem a x, e em ordem a t, obtêm-se, respectivamente, as equações diferenciais parciais hiperbólicas, quase-lineares, seguintes (sistema de equações das cordas vibrantes):

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2}=c^2\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad \textbf{(3.6)}$$

e

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2}=c^2\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad \textbf{(3.7)}$$

A solução geral, resulta da integração do sistema, constituído, pelas duas equações anteriores, onde, F e f representam duas funções arbitrárias, cuja expressão, depende da lei de variação de caudais e das condições de fronteira:

$$\begin{cases} H - H_0 = F(x - ct) + f(x + ct) \\ V_0 - V = \dfrac{g}{c}[(F(x - ct) - f(x + ct)] \end{cases} \tag{3.8}$$

No sistema apresentado, H_0 e V_0, representam, respectivamente, a cota piezométrica e velocidade de escoamento no instante $t = 0$.

Na interpretação física da função $F(x - ct)$, toma-se $f = 0$, e considera-se que, um observador se desloca na conduta, a uma velocidade constante, dada pela condição (traduz a distância percorrida pelo observador):

$$x - ct = x_1 - ct_1 = constante \tag{3.9}$$

Nestas condições tem-se, para o primeiro ramo do sistema de equações, que $H - H_0 = F(constante)$ e, consequentemente, a função F, representa a onda de pressão, que se desloca, com uma velocidade constante de propagação, c, no sentido do escoamento (sentido positivo do eixo das abcissas).

De forma análoga, admita-se que $F = 0$, e considere-se um observador, que se desloca, de acordo com a seguinte condição de movimento:

$$x + ct = x_1 + ct_1 = constante \tag{3.10}$$

Assim, tem-se que, a função f, representa a onda de reflecção, que se desloca, segundo uma velocidade, c, no sentido contrário, ou seja, no sentido negativo do eixo das abcissas, e contrário ao do escoamento.

Normalmente, admite-se que o reservatório a jusante da conduta, apresenta dimensões muito grandes, quando comparadas com a conduta, pelo que, não se registarão variações do nível de líquido, no seu interior, durante os regimes transitórios.

Deste modo, na secção do reservatório (fronteira conduta-reservatório), ter-se-á sempre $H = H_0 = constante$, ou seja, a carga não sofrerá variações. Consequentemente, tem-se que $F(x - ct) = -f(x + ct)$, e confirma-se que, quando a onda F é reflectida, convertendo-se na onda f, nenhuma delas sofre qualquer atenuação ou distorção. Tal como referido na análise qualitativa do fenómeno, a onda que se desloca no sentido do reservatório, é completamente reflectida, sob a forma de uma onda igual, mas de sinal contrário.

3.6. MÉTODOS GERAIS DE ANÁLISE MATEMÁTICA

No presente capítulo não será feita uma exposição detalhada, dos métodos para análise matemática do fenómeno do golpe de aríete, porque tal não se enquadra nos objectivos desta dissertação académica. Não obstante, a título informativo, proceder-se-á, a uma breve apresentação e descrição genérica, dos métodos existentes mais importantes, e com maior aceitação entre os especialistas, na análise de regimes transitórios.

Métodos Precedentes ao Advento do Cálculo Automático

O conjunto de hipóteses simplificadoras descrito em 3.5, permite o estabelecimento das equações da dinâmica e da continuidade, que constituem um sistema hiperbólico quase-linear. A obtenção de uma solução exacta destas equações, é impossível.

De modo a ultrapassar este obstáculo, foram desenvolvidos diversos métodos expeditos, gráficos e numéricos, com base em simplificações, cálculos sistemáticos e/ou na experiência adquirida pela prática profissional. Estes métodos são aproximados, e não deverão ser utilizados na análise de instalações, de grande dimensão e complexidade (Chaudhry, 1987).

Os métodos de integração numérica (métodos numéricos), aplicados aos modelos elástico e rígido, são utilizados na resolução de casos concretos de projecto. No caso do modelo elástico, faz-se a aplicação, passo a passo, da expressão $\Delta H = c\Delta V/g$ (fórmula de Joukowsky), para o cálculo da variação de pressão, associada à variação de velocidade. Para o modelo rígido, utiliza-se um esquema simples de diferenças finitas (Parmakian, 1963). Os cálculos, em qualquer dos casos, são efectuados manualmente, através do preenchimento de quadros de cálculo.

Relativamente aos métodos gráficos, o mais conhecido e utilizado, é o de Schnyder-Bergeron. Normalmente, a interpretação deste método é feita, sugestivamente, admitindo a deslocação de “viajantes”, com velocidade igual à da propagação das ondas elásticas, em que presenciam a evolução das funções H e Q, cota piezométrica e caudal, respectivamente, nas secções da conduta que vão percorrendo.

A integração gráfica das equações da dinâmica e da continuidade, permite contemplar as perdas de carga contínuas e localizadas, por introdução de diafragmas fictícios, que induzem a ocorrência de perdas de carga localizadas, equivalentes às reais (Almeida, 1981). Este método, tem a vantagem, de proporcionar a visualização, do fenómeno do golpe de aríete, ao longo da sua aplicação. Permite ainda a introdução de diversas condições de fronteira, e pode ser facilmente aplicado, em casos de condutas, simples e únicas. O grande inconveniente, resulta dos erros associados, à construção dos gráficos.

Métodos Posteriores ao Advento do Cálculo Automático

Existem outros métodos, mais orientados para a utilização do cálculo automático, sendo os mais conhecidos, o método das diferenças finitas (implícito ou explícito), ou o método das características, que produzem resultados mais exactos.

No estudo pelo método das diferenças finitas, as derivadas parciais, são substituídas por diferenças finitas, onde as equações algébricas resultantes do sistema, são resolvidas simultaneamente. Dependendo do tamanho do sistema, poder-se-á ter que resolver um número de equações não lineares muito elevado, de forma simultânea.

Quando as condições de fronteira da instalação a estudar, apresentam maior complexidade, a análise, através deste método, ainda se torna mais difícil, obrigando a recorrer a processos de iteração. O método das diferenças finitas, tem a vantagem de ser bastante fiável, permitindo a análise de um número elevado de passos de cálculo, Δt e Δx, beneficiando da velocidade do cálculo automático. Apresenta, contudo, o inconveniente, de se ter de obedecer a condições de estabilidade, que impõem uma relação obrigatória, entre os passos de cálculo (Swaffield e Boldy, 1993).

O método das características, implica a substituição das equações diferenciais parciais, por um sistema de quatro equações diferenciais totais, que serão depois resolvidas, através de uma aproximação de diferenças finitas de 1ª ordem (Almeida, 1981).

Uma vez que a análise, de cada ponto da conduta, e condição de fronteira é feita de forma independente, em cada passo de cálculo, este método, é bastante apropriado, para o estudo de instalações, com condições de fronteira, de elevado grau de complexidade. O inconveniente da sua aplicação, reside no facto de ser necessário utilizar passos de cálculo muito curtos, de forma a garantir a fiabilidade dos resultados, o que deixa de ter qualquer expressão, com a utilização do computador (Swaffield e Boldy, 1993).

4. ALGUMAS BASES PARA ANÁLISE PRELIMINAR DO GOLPE DE ARÍETE

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Geralmente, a elaboração de projectos de sistemas elevatórios, envolve duas fases distintas, a fase de estudo prévio, e a fase de projecto de execução. A análise do golpe de aríete, é um procedimento fundamental, não apenas em projectos de novos sistemas elevatórios, mas também na remodelação de instalações existentes, caso impliquem alterações das condições de funcionamento.

Na fase de estudo prévio, procede-se à análise simplificada do golpe de aríete, sem considerar o recurso a mecanismos de protecção. Caso se verifique a necessidade da sua adopção, seguir-se-á um processo de selecção, pré-dimensionamento e análise de comportamento, dos dispositivos mais adequados, para protecção da conduta elevatória, contra as variações máximas de pressão.

Na análise preliminar, dever-se-á admitir que, na origem do golpe de aríete, está a interrupção súbita do fornecimento de energia eléctrica aos grupos electrobomba. Nesta etapa, recorrem-se a métodos aproximados de análise.

Para a elaboração de um projecto de execução, dever-se-á recorrer a métodos de cálculo, que possibilitem a análise dos efeitos do golpe de aríete, e o dimensionamento de eventuais dispositivos de protecção. Os métodos associados ao cálculo automático, pelo maior rigor dos resultados produzidos, representam o procedimento mais apropriado.

Previamente à apresentação, de alguns sistemas de protecção, contra o golpe de aríete, será feita, no presente capítulo, a exposição de alguns dos processos expeditos, empíricos ou aproximados, mais vulgarmente utilizados, para a determinação das pressões extremas, decorrentes deste tipo de regimes transitórios.

Neste tipo de análise, pode ou não, ter-se em consideração, a inércia das massas girantes das bombas e motores, e a acção protectora das respectivas válvulas de retenção.

Os resultados da aplicação, dos métodos expeditos referidos anteriormente, deverão ser indicativos, da possibilidade de ocorrência, de pressões máximas internas, superiores ao valor da pressão de serviço admissível da tubagem, acessórios e equipamento. Por outro lado, os resultados deverão também ser reveladores, da ocorrência de pressões mínimas internas, inferiores à pressão atmosférica, que possam conduzir ao esmagamento da tubagem, ou à ocorrência de rotura da veia líquida.

Durante o processo de análise preliminar, dever-se-á dedicar especial atenção a pontos específicos das condutas elevatórias, tais como, as secções imediatamente a jusante das bombas, a montante das válvulas de controlo de caudal, e nos pontos altos (Almeida, 1990).

4.2. CELERIDADE DAS ONDAS ELÁSTICAS

A celeridade de propagação de uma onda de pressão, depende, das propriedades físicas do fluido e das propriedades da conduta relacionadas com o material, das dimensões e do tipo de amarração ou da colocação da mesma, e ainda da aceleração da gravidade. Admitindo que o escoamento é feito com ausência de ar, na sua forma livre, poder-se-á determinar o valor da celeridade, para condutas de secção transversal circular e o comportamento elástico e linear, recorrendo à expressão seguinte (Parmakian, 1963):

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho\left(\frac{1}{k} + \frac{Dc_1}{E_m e}\right)}} \quad \textbf{(4.1)}$$

Em que:

$c =$ velocidade de propagação da onda de pressão (m/s);

$k =$ módulo de compressibilidade volumétrica (Kgf/m^2);

$D =$ diâmetro interno da conduta (m);

$E_m =$ módulo de elasticidade de Young (N/m^2);

$e =$ espessura da parede da conduta (m);

$\rho =$ massa especifica do fluido (u.m.m./m^3);

$c_1 =$ coeficiente cujo valor é função dos constrangimentos axiais e da relação D/e.

Os valores do parâmetro c_1, podem ser determinados do modo seguinte:

$c_1 = 1$, para condutas com juntas de expansão, e amarradas nas extremidades;

$c_1 = 1 - \mu^2$, para condutas impedidas de ter movimentos axiais;

$c_1 = \frac{5}{4} - \mu$, para condutas sem juntas de expansão, amarradas na extremidade de jusante;

$\mu =$ coeficiente de Poisson (m^2/s).

No caso de a conduta estar enterrada, o cálculo do valor da celeridade, deverá ser feito, admitindo que, a conduta está impedida de ter movimentos axiais (Almeida, 1982).

As expressões para a determinação do valor da celeridade, em outros tipos de condutas, podem ser encontradas na bibliografia da especialidade, como por exemplo, em Wylie e Streeter (1993).

Normalmente, na determinação do valor da celeridade, é desprezado o efeito da pressão e da temperatura, sendo, para condutas de abastecimento de água, utilizados os seguintes valores, para ρ e K (Almeida, 1982):

$$\rho = 102\ u.m.m.m^{-3} = 1000\ kgm^{-3}$$

$$k = 210 \times 10^{6}\ kgfm^{-2} = 206{,}8 \times 10^{7}\ Nm^{2}$$

Na Tabela 4.1, são apresentados alguns valores das propriedades físicas, de condutas constituídas por diversos materiais. Em fase de análise preliminar do golpe de aríete, aceita-se a aplicação dos valores apresentados. Para maior rigor na determinação da celeridade das ondas elásticas, é aconselhável consultar os fabricantes das condutas, para obtenção dos valores mais apropriados.

Tabela 4.1. Propriedades físicas dos materiais mais comuns de condutas (Adaptado de Thorley, 2004)

MATERIAL DA CONDUTA	MÓDULO DE YOUNG $\mathbf{E \times 10^{-10}\ (N/m^2)}$	COEFICIENTE DE POISSON $\boldsymbol{\mu}$
Aço	20,00 – 21,50	0,28
Alumínio	6,90	0,33
Betão	2,00 – 3,00	0,15
Betão pré-esforçado	3,00 – 6,00	-
Cobre	12,00	0,38
Ferro fundido	17,20	0,30
Fibrocimento	2,40	-
PVC rígido (a 20ºC)	0,33	0,50
Polietileno	0,17	0,33
Nylon	0,14 – 0,28	0,50
Plexiglas	0,50	0,28
Perspex	0,62	0,33
Vidro	0,70 – 0,80	0,24
Titânio	10,30	0,34

Para situações em que a conduta elevatória, é constituída, por troços, com características diferentes (diâmetro, material ou espessura da parede), pode ser adoptado, em estudos simplificados, um valor equivalente, determinado através da equação seguinte (Lencastre, 1996):

$$\bar{c} = L \Big/ \sum_{I} L_i c_i \qquad \textbf{(4.2)}$$

Em que:

$\bar{c}$ = celeridade equivalente (m/s);

L = extensão total da conduta (m)

$L_i; c_i$ = extensão e celeridade de cada troço da conduta, respectivamente.

Almeida (1991), apresenta o ábaco da Figura 4.1, para dedução do valor da celeridade, válido para condutas, de escoamento exclusivo de água.
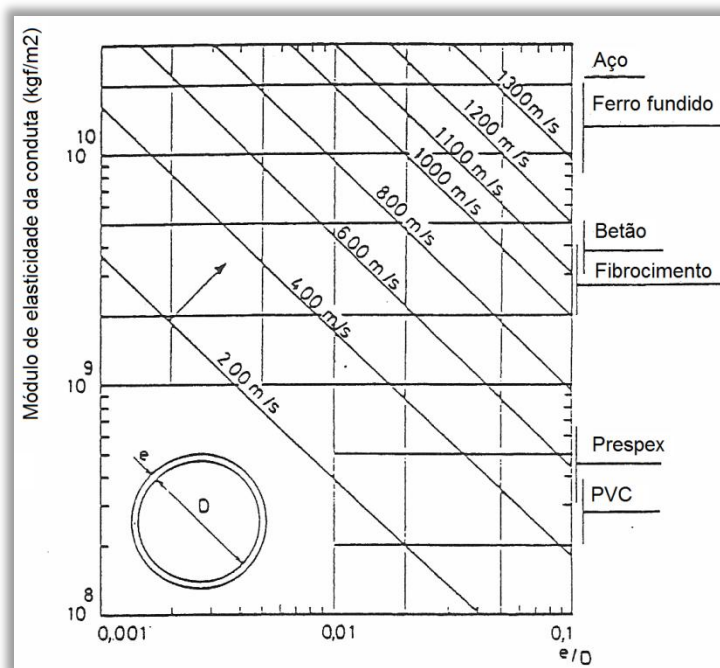
Figura 4.1. Valor da celeridade das ondas elásticas em condutas com água (Adaptado de Almeida, 1991)

Na realidade, as condutas não são perfeitamente elásticas, factor que, além das perdas de carga, também contribui, para a atenuação dos efeitos golpe de aríete. Estudos recentes sobre esta questão, têm revelado valores de celeridade das ondas elásticas, mais baixos que os esperados, conduzindo a rectificações, em métodos computacionais ou, inclusivamente, à aplicação de coeficientes de atenuação, nos cálculos (Popescu et al., 2003).

Fenómenos como a cavitação, a rotura da veia líquida, e a existência de bolsas de ar acumulado, também afectam a velocidade de propagação de ondas de pressão, constituindo, em alguns casos, factores atenuantes do golpe de aríete (Almeida, 1989).

Popescu et al. (2003), apresentam os resultados gráficos de um estudo, referente, à variação da celeridade, em função da percentagem de ar na forma livre, α, e em função da pressão, no interior de uma conduta, para situações de escoamentos bolhosos (Figura 4.2).
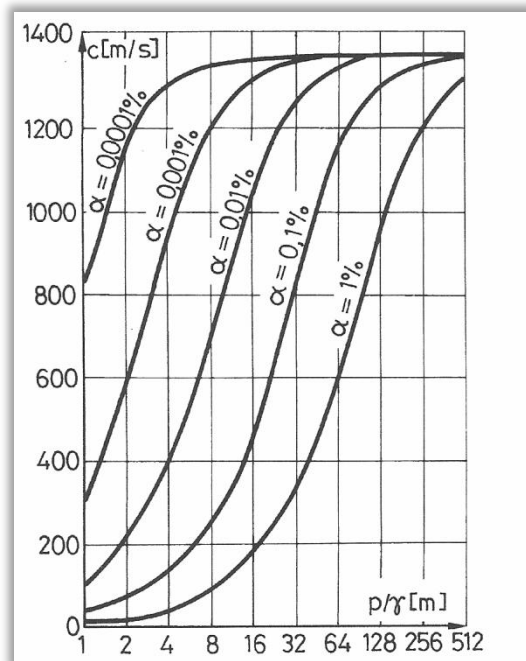
Figura 4.2. Influência de ar na forma livre e da pressão numa conduta, no valor da celeridade (Popescu et al., 2003)

4.3. GOLPE DE ARÍETE EM SITUAÇÕES DE MANOBRA RÁPIDA

De forma semelhante ao praticado até aqui, a exposição, feita no presente capítulo é baseada num sistema elevatório simples, constituído por dois reservatórios, ligados, através de uma conduta forçada, em que a bomba, se encontra instalada, junto ao reservatório de montante. Devido à paragem da bomba, ocorrerá um regime transitório, do tipo golpe de aríete.

Manobra Instantânea

Considere-se, mais uma vez, a anulação instantânea de caudal (hipótese fisicamente impossível), devido ao corte no fornecimento de energia eléctrica, ao grupo electrobomba, com consequente saída de serviço do mesmo. Devido à paragem instantânea da bomba, será gerada uma onda de pressão na secção, imediatamente a jusante da mesma, em direcção ao reservatório de jusante. A amplitude desta onda de pressão, uma vez que, neste instante, ainda não existe qualquer onda reflectida, ou

seja, $f(x+ct)=0$, pode determinar-se, substituindo este termo, no sistema de equações analisado em 3.5:

$$H - H_0 = F(x - ct)$$
$$V_0 - V = \frac{g}{c} F(x - ct) \quad \textbf{(4.3)}$$

Resolvendo as equações acima representadas, em ordem a $H - H_0$, ter-se-á:

$$H - H_0 = \frac{c}{g}(V_0 - V) = -\frac{c}{g}(V - V_0) \quad \textbf{(4.4)}$$

Que corresponderá a escrever:

$$\Delta H = -\frac{c}{g}\Delta V \quad \textbf{(4.5)}$$

A expressão anterior é, geralmente, designada por fórmula de Frizell-Joukowsky, sendo também conhecida por fórmula de Allievi. Na mesma expressão, ΔV representa a variação de velocidade do líquido, na secção da bomba, no instante em que a manobra se completa.

Tempo de Manobra Igual ou Inferior a $2L/c$

Se, a distância entre a origem da perturbação e o reservatório de jusante, for tal que, uma onda de pressão, reflectida neste, não consiga atingir a válvula de retenção, antes de a manobra estar completa, a variação máxima de pressão, junto à válvula de retenção, terá uma amplitude idêntica à que se verificaria, em caso de manobra instantânea. Nesta situação, na secção de execução da manobra, não se faz sentir qualquer atenuação da depressão, devida a ondas reflectidas.

Desta forma, para manobras instantâneas, ou para manobras inferiores ao tempo de ida e retorno de uma onda elástica, a variação máxima de pressão, junto à válvula de retenção, é igual, e também poderá ser determinada pela mesma expressão $\Delta H = -c\Delta V/g$ (Tchobanoglous, 1981).

Para um tempo de manobra, T, igual ou inferior a $2L/c$ segundos, a envolvente de pressão, conserva o seu valor máximo, desde a bomba, até uma determinada secção da conduta, dada pelo comprimento crítico, $L_c = cT/2$, como se exemplifica na Figura 4.3. A partir desse ponto da conduta, até ao reservatório de jusante, começa a registar-se a sobreposição de ondas de pressão, que se deslocam em sentidos opostos, dando origem a um efeito atenuante.
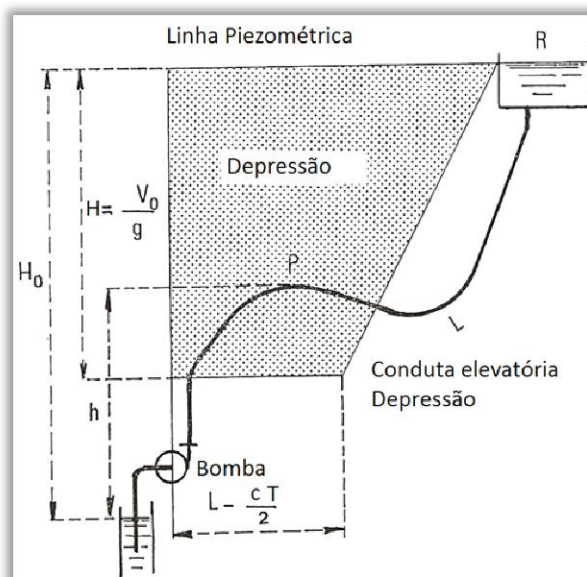
Figura 4.3. Variação da depressão ao longo da conduta para uma manobra rápida (Adaptado de Dupont, 1979)

4.4. GOLPE DE ARÍETE EM SITUAÇÕES DE MANOBRA LENTA

No caso de manobras, que se completam num tempo, T, superior a $2L/c$, ou seja, superior ao tempo de ida e retorno, de uma onda de pressão, ainda se estão a gerar ondas de depressão junto à bomba, quando as ondas reflectidas no reservatório de jusante, atingem a válvula de retenção, provocando a atenuação das primeiras.

De forma simplificada, pode admitir-se, em situações de manobra lenta $(T > 2L/c)$, que as envolventes de pressão, variam linearmente ao longo de toda a extensão da conduta (Figura 4.4).
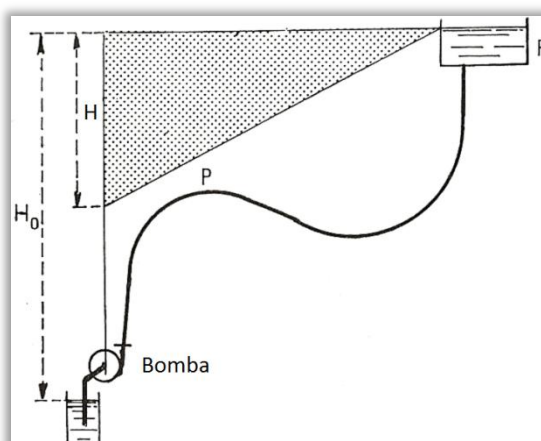
Figura 4.4. Variação da depressão ao longo da conduta para uma manobra lenta (Adaptado de Dupont, 1979)

Para manobras lentas, e admitindo uma variação linear da secção de escoamento, o valor da depressão máxima, na secção da conduta, imediatamente a jusante da válvula de retenção da bomba, poderá ser determinado, através da expressão de Michaud (Lencastre, 1996):

$$\Delta H = \frac{2LQ_0}{gAT_a} \quad \textbf{(4.6)}$$

Em que L e S representam, respectivamente, o comprimento e a área da secção transversal interna da conduta (m^2), e T_a o tempo de anulação de caudal (s).

4.5. TEMPO DE ANULAÇÃO DO CAUDAL

Método de Mendiluce Rosich

Com base na expressão de Michaud, Mendiluce Rosich (1965) desenvolveu e apresentou uma fórmula, para determinação do tempo de anulação de caudal, T_a:

$$T_a = C + \frac{K_L L V_0}{gH_0} \quad \textbf{(4.7)}$$

O coeficiente de fecho, C, função do gradiente hidráulico H_m/L, poderá assumir os valores indicados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2. Valores do coeficiente C (Adaptado de Almeida 1990)

GRADIENTE HIDRÁULICO $\mathbf{H_m/L}$ (%)	VALOR DO COEFICIENTE $\mathbf{C}$ (S)
0,20	1,00
0,25	0,80
0,30	0,60
0,35	0,40
0,40	0,00

Para situações, em que o declive da conduta é superior a 50%, Rosich (1965) aconselha a adopção da expressão de Allievi, para determinação das variações de pressão, em toda a extensão da conduta (Tomaz, 2010).

Relativamente do coeficiente adimensional, K_L, função do comprimento da conduta, este poderá encontrar-se numa gama de valores entre 2,00 e 1,00 (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Valores do coeficiente K_L (Adaptado de Almeida, 1990)

COMPRIMENTO DA CONDUTA, $\mathbf{L}$ (M)	VALOR DO COEFICIENTE $\mathbf{K}_L$
$<$ **500**	2,00
$\approx$ **500**	1,75
$<$ **1500**	1,50
$\approx$ **1500**	1,25
$>$ **1500**	1,00

4.6. ROTURA DA VEIA LÍQUIDA

No presente capítulo, são apresentados dois métodos aproximados, passíveis de serem utilizados, em fase de análise preliminar do golpe de aríete, para determinação da possibilidade de ocorrência, do fenómeno de rotura da veia líquida, no escoamento. Estes métodos, permitem estudar a secção da conduta, adjacente ao grupo electrobomba, de um sistema elevatório, e uma secção intermédia da mesma conduta.

A obtenção de resultados rigorosos só é possível com recurso à análise computacional.

Rotura da Veia Líquida, na Secção Adjacente à Bomba ou Válvula de Retenção

Almeida (1982), citando Li (1962), apresenta um critério simplificado, baseado no modelo rígido, para determinação da ocorrência de cavidades de vapor e gases, a jusante dos grupos electrobomba, numa conduta elevatória, de declive constante.

A lei da variação da velocidade, com que se processa o escoamento, através de uma bomba, o ângulo, θ, que o eixo da conduta forma com a horizontal, e a perda de carga, ΔH, são os principais factores que estão na origem da formação de cavidades de vapor de ar e gases, a jusante da válvula de retenção (Figura 4.5).

A rotura da veia líquida, poderá acontecer, quando se verificar a relação seguinte (Almeida, 1982):

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} > Ag\,\mathrm{sen}(\theta + \Delta H) \quad \textbf{(4.8)}$$

Onde ΔQ, representa a variação de caudal no intervalo de tempo, Δt, A, a área da secção interna da conduta, e θ e ΔH mantém o significado do parágrafo anterior.
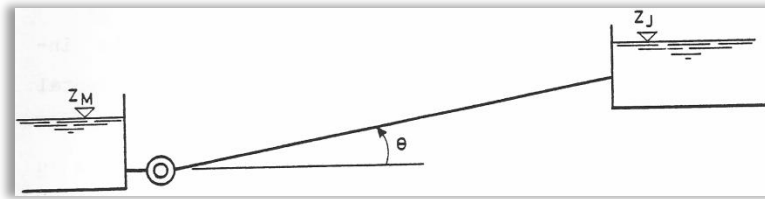
Figura 4.5. Método de verificação de ocorrência de rotura da veia líquida junto à bomba. Definição do ângulo θ (Almeida, 1982)

Admitindo que a variação de pressão, se processa de forma linear, em relação ao tempo, haverá possibilidade de ocorrer rotura veia líquida, a jusante da bomba, se se verificar a relação seguinte (Almeida, 1982):

$$L < \frac{H_0 - H_{min}}{2(sen\theta + \Delta H)} \quad \textbf{(4.9)}$$

Rotura da Veia Líquida, numa Secção Intermédia e Elevada da Conduta

Também Almeida (1982), expõe um outro método expedito, para determinação da possibilidade de ocorrência de rotura da veia líquida, numa secção A, intermédia, de uma conduta, com cota elevada, e a uma distância L_A do reservatório de jusante.

Esse método postula, que haverá rotura de veia líquida na secção A, se a cota piezométrica, no instante $2L_a/c$, obtida pela lei da variação das cotas piezométricas, a jusante da bomba, for igual à cota piezométrica de rotura da veia líquida, H_{RV}. Esta última é dada por $P_v/\gamma + z$, em que, P_v, representa a tensão de vapor de água, à temperatura do escoamento (Nm^{-2} ou kgfm^{-2}), e z a cota do eixo da conduta (m).

Neste caso, o angulo θ é substituído por θ', como indicado na Figura 4.6.
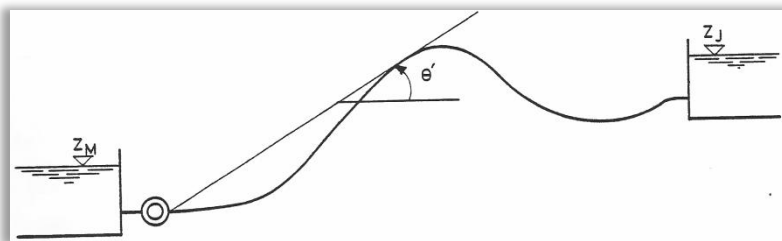
Figura 4.6. Método de verificação de ocorrência de rotura da veia líquida numa secção intermédia da conduta. Definição do ângulo θ (Almeida, 1982)

Em termos práticos, as cotas absolutas de cavitação e rotura da veia líquida, deverão ser consideradas, respectivamente, iguais a 10,33 m e 6,00 m, acima da geratriz superior exterior da conduta (Almeida, 1982).

5. PROTECÇÃO CONTRA O GOLPE DE ARÍETE EM SISTEMAS ELEVATÓRIOS

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A amplitude das variações máximas e mínimas de pressão, a velocidade de propagação das ondas elásticas e o período durante o qual uma conduta elevatória ou parte dela está sujeita aos seus efeitos representam os principais motivos que conduzem a condições de risco de ocorrência de acidentes em sistemas elevatórios.

A análise a expressão de Frizell-Joukowsky, apresentada anteriormente, que determina a amplitude da variação máxima de pressão, como resultado da alteração instantânea da velocidade do escoamento numa conduta elevatória, permite inferir que os mecanismos de controlo das variações máximas de pressão têm como princípio capital a redução da celeridade das ondas elásticas e / ou da velocidade de escoamento no interior de uma conduta elevatória.

Pelo considerável custo económico, normalmente associado à aplicação de mecanismos de protecção contra os efeitos do golpe de aríete e pelo facto de não existir uma solução universal para protecção de todos os sistemas elevatórios, torna-se necessário estudar um conjunto de soluções de aplicação optimizada para cada caso particular. A selecção do mecanismo de protecção deverá passar por aquele que se apresentar como o mais equilibrado, em termos de eficiência na protecção contra os extremos da variação de pressão, de investimento económico e ainda de impacto visual e ambiental.

Thorley (2004) organiza as estratégias de protecção contra os efeitos do golpe de ariete segundo duas categorias. Os mecanismos que compreendem modificações em componentes específicos de um sistema elevatório, com o objectivo de influenciar o seu funcionamento constituem Métodos de Acção Directa. Por outro lado, os mecanismos que envolvem a transferência de energia, para o interior ou para o exterior de um sistema elevatório, integram a categoria dos Métodos de Acção Indirecta. Nos subcapítulos seguintes serão abordados alguns mecanismos que incorporam cada uma das linhas de orientação estratégica de protecção mencionadas.

5.2. MEDIDAS DE ACÇÃO DIRECTA

As medidas de acção directa para evitar os aumentos de pressão num sistema elevatório, são baseadas, fundamentalmente, na intervenção sobre as causas associadas à variação das condições de escoamento, por exemplo, o tipo de válvulas de retenção adoptadas ou o funcionamento dos grupos electrobomba.

5.2.1. AUMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS CONDUTAS

As pressões internas máximas não devem exceder, nas condições normais de operação, o valor da pressão de serviço admissível para cada classe de tubagem, dos acessórios e do restante equipamento. Para alguns materiais, como por exemplo o PVC, a fadiga por repetição dinâmica poderá diminuir o valor limite da pressão interna admissível.

Em geral, nas condutas mais flexíveis e susceptíveis de sofrerem colapso por esmagamento, as pressões mínimas internas, não devem atingir valores inferiores à pressão atmosférica. Quando o líquido a transportar se trata de água para consumo humano, a condição anterior deve ser verificada, independentemente das características da conduta que a transporta. Como referência, a pressão mínima interna relativa, associada à ocorrência de um regime transitório, em sistemas elevatórios de águas residuais, não deverá ser inferior a – 5 m.c.a (Almeida, 1982).

O diferencial de pressão crítico, Δp_{cr}, ao esmagamento da parede de uma conduta e consequente colapso da mesma, em condutas livres de constrangimentos laterais, e em que a pressão externa, p_e, é superior à pressão interna, p_i, pode ser obtido pela expressão seguinte (Almeida 1990):

$$\Delta p_{cr} = (p_e - p_i)_{cr} = \frac{2E_m}{1-\mu^2}\left(\frac{e}{D}\right)^3 \qquad \textbf{(5.1)}$$

Em que E_m representa o módulo de elasticidade (N/m^2) e μ, o coeficiente de Poisson do material da conduta (m^2/s). e e D, representam, respectivamente, a espessura e diâmetro interno da conduta (m).

Almeida (1990), aconselha a aplicação de um coeficiente de segurança, entre 1,0 e 1,5, ao valor obtido para o diferencial de pressão crítico, Δp_{cr}, consoante o grau de importância da instalação elevatória em causa.

Numa abordagem preliminar, o valor de ΔP_{cr}, para condutas completamente confinadas, deverá ser o dobro do valor correspondente, em condutas não enterradas (em condutas enterradas, o valor de ΔP_{cr} tende a aumentar).

Determinado o valor de Δp_{cr} e de p_e, torna-se possível estimar a cota piezométrica mínima limite condicionante, de protecção contra o golpe de aríete.

Em termos de resistência mecânica, devem ser garantidas as condições seguintes:

$$H < H_{RM} = \frac{p_M}{\gamma} + z \qquad \textbf{(5.2)}$$

$$H > H_{RE} = \frac{p_{ie}}{\gamma} + z \qquad \textbf{(5.3)}$$

Em que p_M representa a pressão máxima de serviço admissível, p_{ie} a pressão interna de esmagamento da conduta, por acção da pressão externa, e z a cota do eixo da conduta.

Há casos em que o líquido a transportar numa conduta elevatória apresenta características perigosas, ou por ser corrosivo, ou por ser tóxico ou por se encontrar a temperaturas elevadas e poder evaporar-se para fora sistema elevatório, em caso de ocorrência de fugas (por exemplo, em condutas de arrefecimento de instalações nucleares). O impacto da ocorrência de acidentes em sistemas elevatórios, transportando líquidos de natureza tão perigosa, como acabado de referir, pode ser nefasto para o meio ambiente em que se encontram inseridos os sistemas e, também, implicar a perda de vidas humanas.

Algumas situações de escoamento em pressão de líquidos perigosos, não permitem a aplicação de métodos convencionais, utilizados para fazer face às variações máximas de pressão, resultantes de regimes transitórios. Quando assim acontece, não restam alternativas para além de recorrer a condutas que consigam suportar, em serviço, a pressão interna máxima, incluindo o golpe de aríete. O mesmo procedimento deverá ser aplicado aos acessórios que integram o sistema elevatório.

5.2.2. RECTIFICAÇÃO DA IMPLANTAÇÃO DAS CONDUTAS

A rectificação do traçado previsto para implantação de uma conduta elevatória, poderá minimizar e, em algumas situações, anular efeitos indesejados, associados aos regimes transitórios.

Considere-se duas hipóteses respeitantes à implantação de uma conduta elevatória, representadas sob a forma de perfil longitudinal, na Figura 5.2.
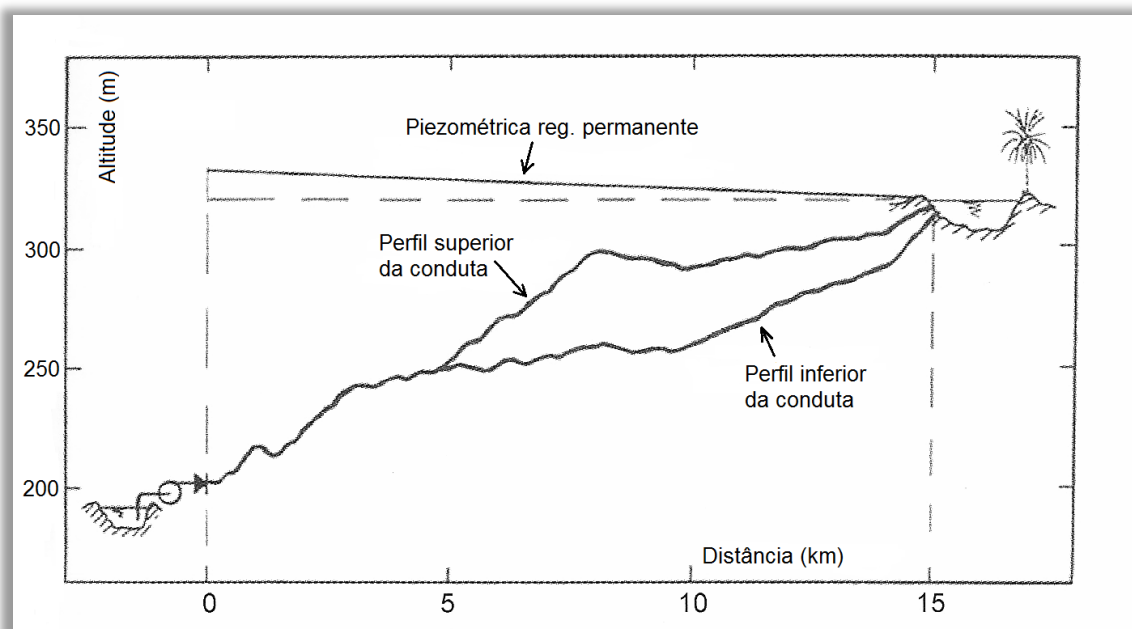
Figura 5.1. Perfis longitudinais alternativos de uma conduta elevatória, como base de exemplo do texto (Adaptado de Thorley, 2004)

Até cinco quilómetros de distância, o traçado da conduta, bem como o perfil longitudinal são comuns para ambas as soluções e entre esse ponto e o reservatório de jusante, o perfil longitudinal de um dos traçados é, altimetricamente mais elevado que o outro.

Da paragem do grupo electrobomba, com consequente anulação de caudal, resultam as envolventes de pressão máxima e mínima, indicadas na Figura 5.2.
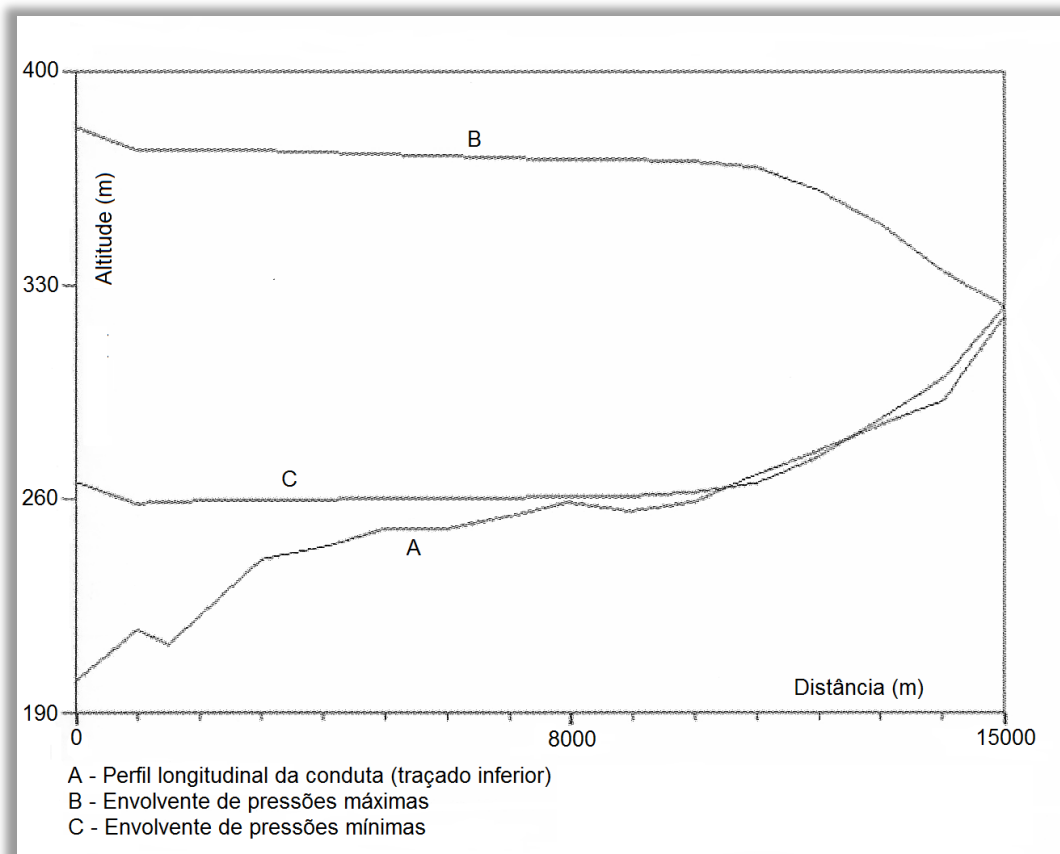
Figura 5.2. Perfil inferior da conduta elevatória - Envolventes de pressão máxima e mínima, após paragem do grupo electrobomba (Adaptado de Thorley, 2004)

Verifica-se, pela análise da figura anterior, que o perfil correspondente ao traçado inferior da conduta elevatória se encontra sempre abaixo da envolvente de pressões mínimas. Apesar de existirem dois pontos (distam da secção da bomba 10,5 e 12,5 km, aproximadamente) em que a envolvente de pressões mínimas e o perfil da conduta são coincidentes, os efeitos provocados pelas depressões máximas são pouco relevantes.

Por sua vez, no caso do perfil superior da conduta, após a paragem da bomba, uma onda de depressão com as mesmas características que as apresentadas na Figura 5.2 (envolvente de pressões mínimas – C), é transmitida pela conduta, em toda a sua extensão. Porém, nos dois terços finais da conduta elevatória os efeitos do golpe de aríete fazem-se sentir de forma bastante diferente,

uma vez que a envolvente de pressões mínimas cruza o perfil da conduta, provocando pressões inferiores à pressão atmosférica, chegando-se a atingir a tensão de vapor da água (Figura 5.3).
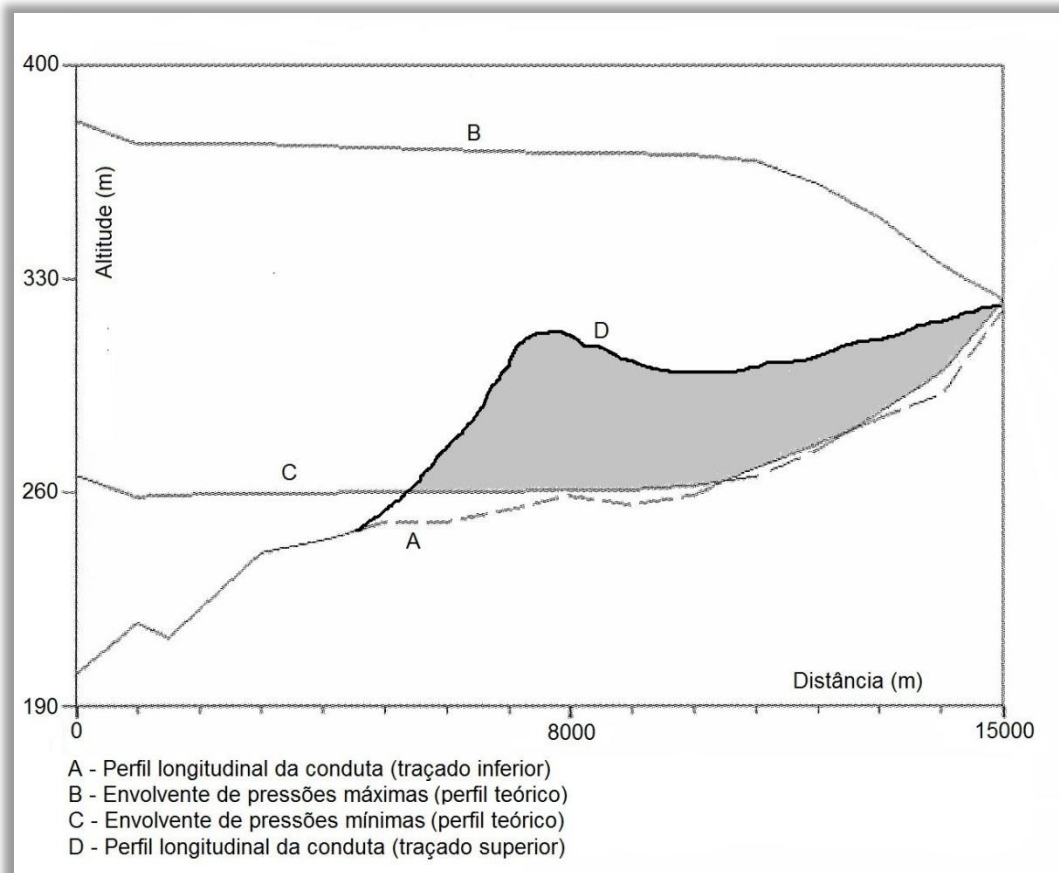
Figura 5.3. Perfil superior da conduta elevatória - envolventes de pressão máxima e mínima, após paragem do grupo electrobomba (Adaptado de Thorley, 2004)

As condições descritas em cima e apresentadas na figura anterior estão na origem da ocorrência de fenómenos de cavitação e rotura da veia líquida. Como descrito em capítulos anteriores, os efeitos decorrentes da verificação destes fenómenos estão, geralmente, associados a um elevado grau de destruição.

Deste modo, a eleição do perfil inferior, com face convexa voltada para baixo, garante um grau de risco de formação de cavidades gasosas, bastante inferior à opção do perfil superior, com face convexa voltada para cima.

A rectificação do perfil de uma conduta elevatória pode ser conseguida preconizando a sua implantação através de obstáculos ou contornando os mesmos. Em determinados casos, uma análise técnico-económica pode justificar grandes escavações, inclusivamente a abertura de túneis e microtúneis.

Os dois procedimentos apresentados até aqui (aumento da resistência mecânica da tubagem e alteração da implantação de uma conduta) são, regra geral, demasiado dispendiosos, especialmente, quando constituem a única medida de controlo dos regimes transitórios e dos seus efeitos num sistema elevatório.

5.2.3. REDUÇÃO DO ATRASO NO FECHO DE VÁLVULAS DE RETENÇÃO

Uma das válvulas de controlo mais utilizadas em sistemas hidráulicos é a válvula de retenção ou anti-retorno. Normalmente este tipo de válvulas é instalado a jusante das bombas, de forma a impedir que, após paragem das mesmas, o escoamento se processe no sentido contrário ao normal. Situação menos usual, mas possível, é a utilização de válvulas de retenção como meio de protecção contra o golpe de aríete, sendo instaladas ao longo de uma conduta elevatória, em particular, nas regiões passiveis de ocorrência de rotura da veia líquida (Sharp e Sharp, 1996).

As válvulas de retenção, teoricamente, ideais para instalação num sistema elevatório, deverão garantir um tempo de fecho do obturador tão rápido quanto possível, logo que o caudal escoado se anule.

Em sistemas de bombagem de reduzida complexidade e dimensão, para elevação de caudal, exclusivamente a partir de uma bomba, até desníveis geográficos de 20 metros, em que as respectivas condutas elevatórias apresentam comprimentos não superiores a 500 metros, a solução para controlo do golpe de aríete pode consistir na instalação de uma válvula de retenção tipo charneira na conduta, provida de alavanca e contrapeso exterior (Figura 5.4), que permite optimizar o tempo de fecho da mesma, quando o sentido de escoamento se inverte. (Tchobanoglous, 1981).

Figura 5.4. Válvula de retenção tipo charneira, com alavanca e contrapeso (Catálogos Técnicos Fucoli-Somepal, 2011)

O obturador de uma válvula de retenção desprovida de alavanca e de contrapeso pode permanecer aberto, no instante em que o caudal escoado numa conduta elevatória se anula, devido à saída de serviço da bomba. Por vezes, o período durante o qual o obturador permanece aberto é tão elevado que, quando o escoamento inverte o seu sentido (ver Capítulo 3), pode provocar, também, a inversão

do movimento normal de rotação da bomba, passando esta a funcionar como uma turbina. Tchobanoglous (1981) quantifica alguns efeitos causados pela verificação das condições descritas, em sistemas elevatórios de águas residuais (Tabela 5.1)

Tabela 5.1. Falha no fecho de uma válvula de retenção. Quantificação de consequências

EFEITOS RESULTANTES DE UM PERÍODO MUITO LONGO DE FECHO DA VÁLVULA DE RETENÇÃO	ORDEM DE GRANDEZA (EM RELAÇÃO A VALORES MÉDIOS REGISTADOS)
Aumento do caudal escoado, no sentido inverso, quando comparado com o caudal elevado por uma bomba, durante o regime permanente	50 - 110%
Aumento da velocidade máxima de propagação das ondas de pressão, associadas ao regime transitório	125 - 150%
Aumento da amplitude máxima das ondas de pressão, associadas ao regime transitório	150 - 175%

Por outro lado, se o obturador da válvula fecha de forma brusca, acompanhado a elevada velocidade com que se processa o escoamento, no sentido contrário ao normal, podem ser geradas, de forma instantânea, variações de pressão máxima de grande amplitude, com potenciais consequências destrutivas para um sistema elevatório. Do fecho brusco da válvula e consequente embate violento do obturador, podem resultar danos nas juntas e selagens de uma conduta, especialmente, quando tal ocorre com bastante frequência.

A instalação de válvulas de retenção, providas de alavanca e contrapeso, reduz consideravelmente a possibilidade do obturador da válvula permanecer aberto. As válvulas de retenção de charneira, providas de um sistema de alavanca e mola (Figura 5.5), também podem evitar o embate violento do obturador da válvula.

Figura 5.5. Válvula de retenção tipo charneira, com alavanca e mola (Catálogos Técnicos AVK, 2004)

Em instalações de grande dimensão, associadas a elevadas pressões de serviço, as válvulas de retenção descritas anteriormente, não são eficientes no processo de optimização do tempo de fecho do obturador de uma válvula. Normalmente, nestas instalações, mesmo após a paragem de uma bomba, continua a ser fornecida uma grande quantidade de energia ao escoamento, como são exemplos disso, a paragem de uma bomba, integrada num conjunto de duas ou mais, a funcionar em paralelo, bem como a paragem de uma bomba que alimenta uma conduta elevatória, protegida por um reservatório de ar comprimido (Thorley, 2004).

Em sistemas elevatórios com as características descritas no parágrafo anterior, deverá ser preconizada a instalação de outro tipo de válvulas mais eficientes, como são exemplo disso, as válvulas de retenção de deslocamento axial e fecho rápido (em Portugal não existe uma designação unânime atribuída a estas válvulas, mas na língua inglesa são designadas por "nozzle-type valves"). Estas válvulas anti-retorno possuem um obturador central, de deslocamento axial, normalmente, com a forma de um disco. O obturador é conduzido por uma haste, sendo o movimento de fecho deste assistido por uma ou mais molas (Figura 5.6).
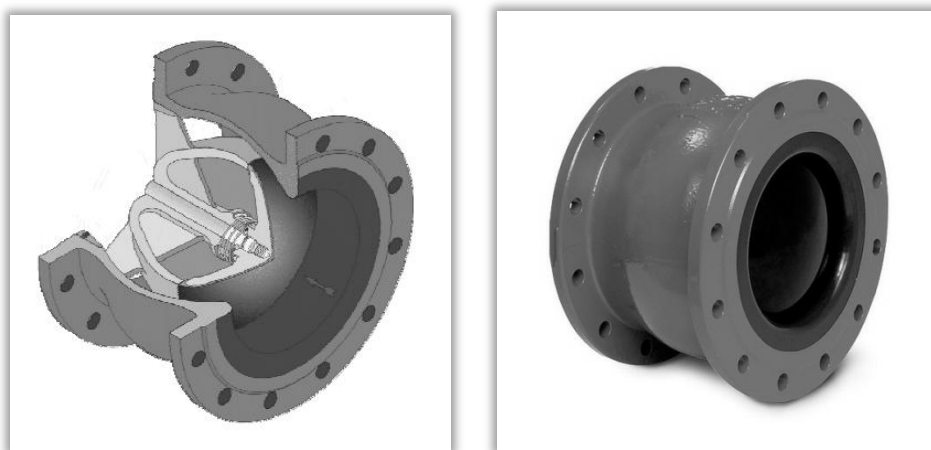
Figura 5.6. Válvula de retenção de deslocamento axial e fecho rápido (Catálogos Técnicos Erhard, 2006)

Thorley (2004) expôs o caso de um sistema elevatório, localizado no continente europeu, em que se verificava, frequentemente, a ocorrência de fecho brusco e violento das válvulas de retenção de charneira instaladas, quando uma, das três bombas instaladas em paralelo, saía de serviço. O autor refere que após a substituição das válvulas de retenção convencionais instaladas, por válvulas de deslocamento axial, o fenómeno de embate violento do obturador da válvula deixou de acontecer. A representação gráfica da variação de pressão, após saída de serviço de uma das três bombas em paralelo, na secção adjacente às válvulas de retenção, antes e depois da substituição destes equipamentos, é apresentada na Figura 5.7 e na Figura 5.8, respectivamente.
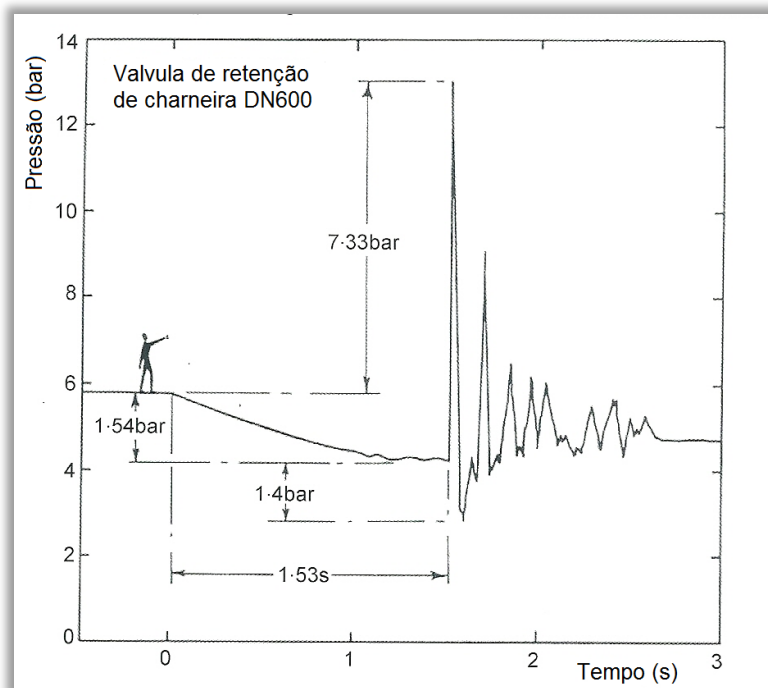
Figura 5.7. Variação de pressão na secção das válvulas de retenção de charneira, após paragem de um dos três grupos a funcionar em paralelo (Adaptado de Thorley, 2004)

Pela análise do gráfico anterior, verifica-se que o atraso na manobra completa da válvula, em relação à paragem de uma das bombas é de 1,53 segundos. Tal desfasamento temporal é traduzido numa amplitude máxima da sobrepressão, na secção da válvula, devida ao retorno da massa líquida na conduta, superior a 70 m.c.a.
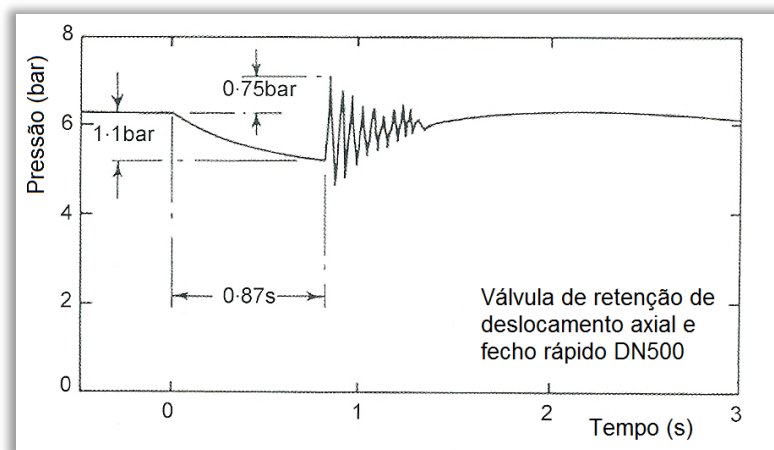
Figura 5.8 Exemplo de variação de pressão na secção das válvulas de retenção de deslocamento axial, após paragem de um dos três grupos a funcionar em paralelo (Adaptado de Thorley, 2004)

Na fase posterior à substituição das válvulas de retenção, o desempenho dos novos equipamentos instalados garantiram um tempo de obturação completa de 0,87 segundos, para as mesmas condições de análise anteriores. A maior rapidez no fecho do obturador, permitiu a restrição da amplitude máxima das ondas de sobrepressão, associadas ao golpe de aríete, a menos de 10 m.c.a.

Em geral, as válvulas de retenção do tipo de deslocamento axial e fecho rápido são equipamentos dispendiosos. Porém, existe uma alternativa equilibrada, em termos económicos e de eficiência, que passa pelas válvulas de retenção de duplo prato ou de disco bipartido (Figura 5.9).

Figura 5.9. Válvula de duplo prato (Catálogos Técnicos AVK, 2004)

5.2.4. AUMENTO DA INÉRCIA DOS GRUPOS ELECTROBOMBA E RESPECTIVOS MOTORES

Após a saída de serviço do grupo electrobomba de um sistema elevatório, a redução dos efeitos do consequente regime transitório, pode ser conseguida, quando o momento de inércia da bomba centrifuga e do motor, garante a continuidade de rotação da bomba por mais alguns instantes. O referido prolongamento do período de rotação da bomba e do motor, permite prosseguir com o fornecimento de líquido à conduta elevatória, atenuando o efeito de desaceleração da coluna líquida a jusante e, com isso, prevenir a ocorrência de situações de vácuo na extensão inicial da conduta (Stephenson, 1989).

Para se conseguir aumentar a inércia de um grupo electrobomba e, consequentemente, o seu tempo de paragem, poder-se-á introduzir no sistema uma massa adicional. Para tal, pode recorrer-se à instalação de um volante de inércia sobre o veio da bomba. No entanto, a aplicação deste método apresenta algumas restrições, uma vez que, em casos de sistemas com condutas muito extensas, o peso de um volante de inércia seria incomportável. Ao peso excessivo do dispositivo, acresceria a exagerada potência do motor da bomba, necessária para vencer a inércia do volante.

Apesar das limitações referidas em cima, o aumento da inércia do próprio grupo, eventualmente, obtido pela inércia do volante, pode constituir uma solução simples para alguns casos (Lencastre, 1996).

Figura 5.10. Volante de inércia instalado no veio de uma bomba (Informação académica da disciplina de Hidráulica Geral – FCT/UNL, 2006)

Stephenson (1989) propõe uma regra prática, que permite inferir se os efeitos do golpe de aríete, em particular, as depressões, podem ou não ser reduzidos pela inércia de um grupo electrobomba. Se a condição apresentada em baixo se verificar, a inércia do grupo poderá reduzir as depressões em, pelo menos 10%:

$$\frac{In^2}{\rho ALH_0^2} \geq 0{,}01 \tag{5.4}$$

Em que I representa a inércia do grupo electrobomba (kg/m^2), n a velocidade de rotação da mesma (rpm), ρ a densidade do fluido escoado (kg/m^3), A a área da secção de escoamento da conduta (m^2), L o comprimento da conduta (m) e H_0 a altura de elevação da bomba (m).

A inércia própria de um grupo electrobomba é, usualmente, designada por $PD^2 = 4I$, em que P é a massa girante (kg).

Sharp e Sharp (1996) apresenta um caso de estudo do efeito da inércia de um grupo electrobomba, no fenómeno de rotura da veia líquida, consequência das depressões máximas, geradas após saída de serviço do grupo. Os resultados gráficos da análise computacional, de duas situações distintas, apresentados no referido trabalho, são reproduzidos em seguida.

Numa primeira situação de estudo, foi admitido que grupo electrobomba tem inércia característica, PD^2, igual a 5 000 kg/m^2. A Figura 5.11 ilustra a condição de vácuo verificada em quase toda a extensão da conduta elevatória, após paragem do grupo electrobomba. A condição de vácuo tem início numa secção da conduta, localizada a uma distância da extremidade de montante da conduta elevatória, igual a 2 078 metros.
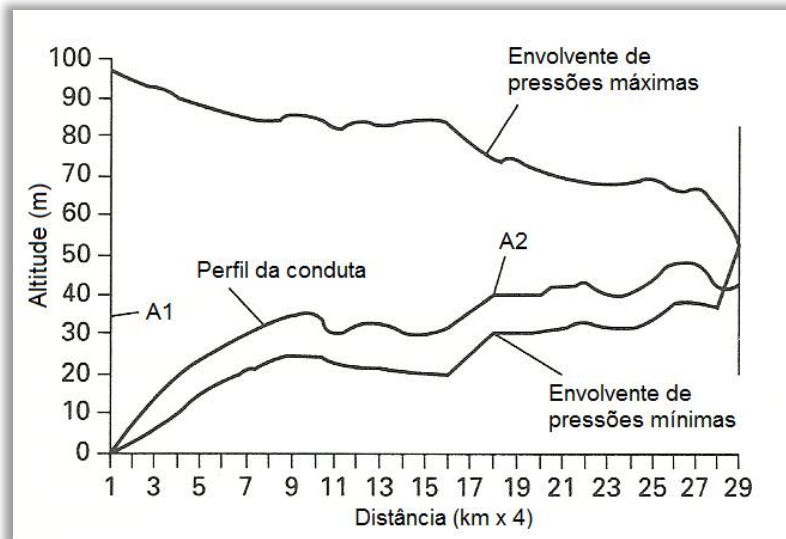
Figura 5.11. Ilustração da variação máxima de pressão, após paragem da bomba, para $PD^2 = 5\ 000$ (Adaptado de Sharp e Sharp, 1996)

O historial da variação de pressão, tendo em conta os pressupostos da primeira situação de análise, nos primeiros 85 segundos, em duas secções distintas da conduta elevatória, A1 e A2, é apresentado na Figura 5.12.
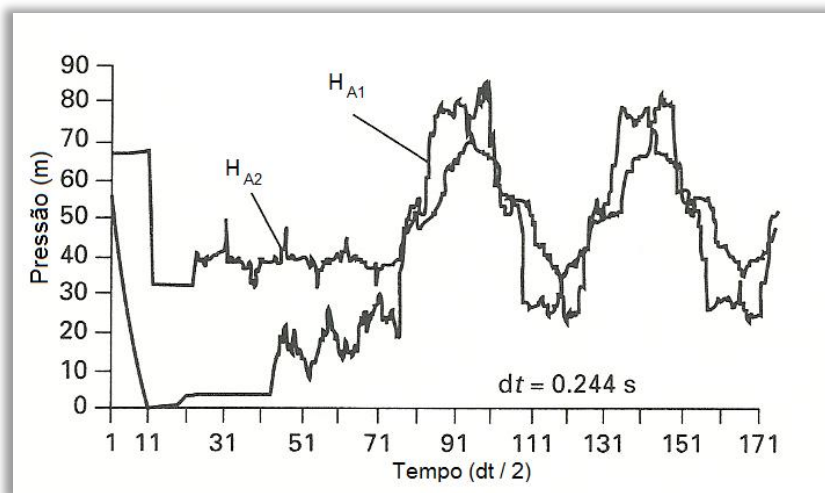
Figura 5.12. Ilustração da variação de pressões em duas secções da conduta, A1 e A2, após paragem da bomba, para $PD^2 = 5\ 000$ (Adaptado de Sharp e Sharp, 1996)

Após obtenção dos resultados da simulação computacional da paragem da bomba, com um valor de PD^2 igual a 5 000 kg/m^2 , os autores do estudo alteraram as condições de análise, passando a considerar um valor de PD^2, próprio do grupo, igual a 15 000 kg/m^2.

A representação gráfica das envolventes de pressão máxima e mínima, resultantes da simulação para as novas condições, é apresentada na Figura 5.13. Da análise do gráfico é possível verificar que a distância, em relação à extremidade de montante da conduta, a partir da qual tem início a condição de vácuo, é de 5 040 metros.
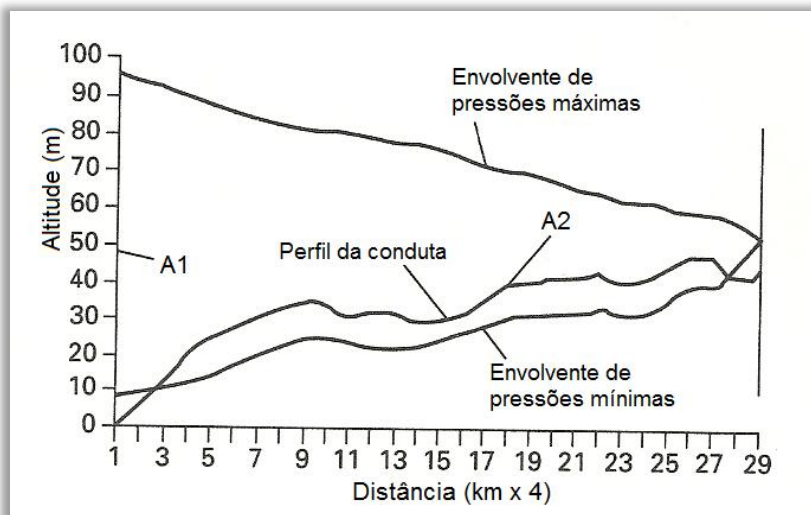
Figura 5.13. Representação da variação máxima de pressão, após paragem da bomba, para $PD^2 = 15\ 000$ (Adaptado de Sharp e Sharp, 1996)

Na Figura 5.14, são apresentados os resultados da variação de pressão nas mesmas secções da conduta, A1 e A2, ao longo dos 85 segundos que, se seguiram, imediatamente, à saída de serviço do grupo electrobomba ($PD^2 = 5\ 000$).
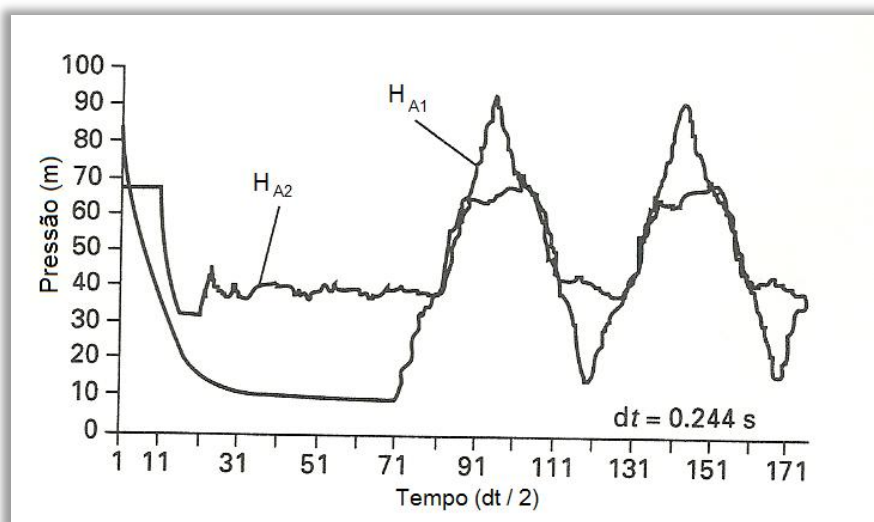
Figura 5.14. Representação da variação de pressões em duas secções da conduta, A1 e A2, após paragem da bomba, para $PD^2 = 5\ 000$ (Adaptado de Sharp e Sharp, 1996)

Os autores referem ainda que, se o valor da inércia, PD^2, fosse tomado como 10 000 kg/m^2, o início da condição de vácuo no interior da conduta elevatória far-se-ia sentir a 2 375 m de distância da extremidade de montante da mesma (os resultados gráficos desta simulação são omissos).

A comparação destes resultados permite perceber o efeito da variação da inércia, PD^2, na forma como se processa a formação da condição de vácuo numa conduta elevatória, após saída de serviço de um grupo electrobomba. Essencialmente, verificando-se um retardamento do seu início, ou seja, há uma mitigação das depressões máximas nos trechos da conduta mais próximos da bomba, decorrente do aumento do PD^2 próprio do grupo.

Relativamente às sobrepressões, o estudo concluiu que não há diferenças significativas entre as diferentes condições simuladas. Desta forma pode-se inferir que os efeitos da variação dos valores da inércia de um grupo electrobomba, nem sempre obedecem a uma relação de proporcionalidade.

Em sistemas elevatórios mais simples, com condutas elevatória de curta extensão e altura de elevação reduzida, o aumento da inercia de um grupo produziria resultados muito mais satisfatórios que os registados para a situação estudada,

5.3. MEDIDAS DE ACÇÃO INDIRECTA

As técnicas de acção indirecta, representam a estratégica de protecção contra os efeitos do golpe de aríete, com maior aceitação na indústria da engenharia hidráulica. Estas técnicas envolvem a instalação de dispositivos que, de forma indirecta, garantam o controlo das variações de caudal e das pressões inerentes aos regimes transitórios. Os princípios básicos de funcionamento dos dispositivos integrados nesta categoria são os indicados a seguir (Almeida, 1990):

- Acumulação e cedência alternada de energia ao escoamento, incluindo ou não o armazenamento e cedência de água, durante o regime transitório;
- Cedência de água durante o regime transitório;
- Estabelecimento de ligação temporária ao exterior (atmosfera), a uma conduta ou a um reservatório, em função da pressão interna e dos desníveis concretos.

Alguns exemplos mais comuns de dispositivos deste tipo são os reservatórios de ar comprimido (RAC) ou hidropneumáticos, os reservatórios unidireccionais (RUD), as chaminés de equilíbrio, as válvulas de admissão de ar ou ventosas, as válvulas de alívio e as condutas de alimentação paralela ou “by-bass”.

De modo a maximizar a sua eficiência, grande parte dos dispositivos mencionados deverão ser instalados no sistema elevatório, o mais próximo possível da origem do regime transitório, por exemplo, junto do grupo electrobomba ou da válvula de retenção. As excepções, em geral, a esta condição são as válvulas de admissão de ar, e pelas limitações que serão analisadas posteriormente, os reservatórios unidireccionais.

5.3.1. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

A chaminé de equilíbrio, também designada por reservatório bidireccional, é um dispositivo que permite atenuar as variações bruscas de caudal e de pressão, através da cedência e de armazenamento de energia e água numa câmara aberta, ou seja, em que a água se encontra em contacto directo com a atmosfera. O amortecimento das variações de caudal, durante a fase de queda da pressão, é conseguido pela alimentação da conduta a partir da câmara. Por outro lado, na fase de aumento da pressão, o movimento da água processa-se no sentido contrário, ou seja, da conduta para o reservatório, verificando-se o enchimento do segundo elemento.

Este dispositivo é utilizado, principalmente em condutas de alimentação de turbinas, em instalações hidroeléctricas. Não obstante, em alguns casos, particularmente quando as características topográficas são favoráveis, é possível a sua aplicação em sistemas elevatórios. É, no entanto, raro encontrar uma situação em que a linha piezométrica de um escoamento em regime permanente, numa conduta elevatória, seja tão baixa que permita a utilização de um reservatório aberto, como é o caso da chaminé de equilíbrio (Stephenson, 1989).

Em geral, por razões técnico-económicas, as câmaras de equilíbrio são órgão de desenvolvimento vertical e apresentam configuração cilíndrica. Na Figura 5.15 é apresentada uma chaminé de equilíbrio com 17 metros de altura e 1,9 metros de diâmetro, que alimenta uma conduta DN1250, através de uma tubagem com 1000 milímetros de diâmetro.
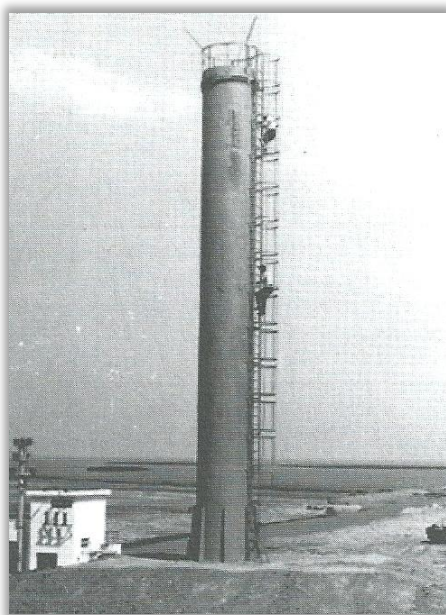
Figura 5.15. Chaminé de equilíbrio integrada no Sistema Elevatório SP-2 Sarichioi, na Roménia (Popescu et al., 2003)

Na Figura 5.16 é representado um esquema de uma instalação típica de uma chaminé de equilíbrio num sistema elevatório, em que Z representa a flutuação do nível do líquido no interior do

reservatório, P(t) a variação da pressão em função do tempo, associada à ocorrência de um regime transitório, H_G o desnível geométrico entre a superfície do líquido nos reservatórios de montante e jusante e Q(t) o caudal escoado em função do tempo.
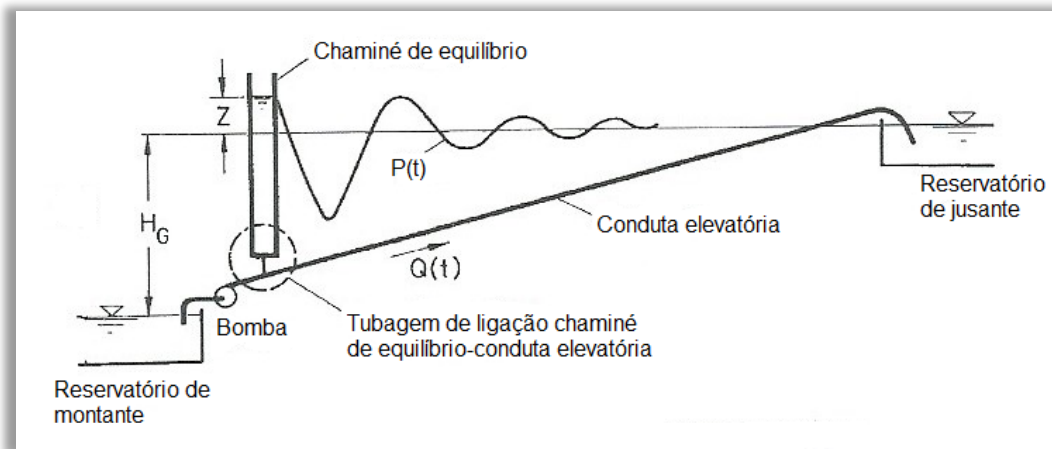
Figura 5.16. Esquema genérico de um sistema elevatório equipado com uma chaminé de equilíbrio (Adaptado de Popescu, et al., 2003)

Como referido, durante o regime permanente, o nível da água no interior de um reservatório bidireccional, instalado num sistema elevatório, tem que coincidir com a cota piezométrica da secção da conduta à qual o reservatório se encontra ligado. Desta forma é garantido um equilíbrio entre a pressão da água no interior da câmara e a pressão característica do escoamento na mesma secção, fornecida pelo grupo electrobomba. Com a saída de serviço do grupo, a pressão na base da chaminé de equilíbrio baixa e quebra-se, por instantes, o equilíbrio.

Se a secção útil da chaminé de equilíbrio for bastante ampla, as ondas de pressão geradas na bomba, após paragem da mesma, são reflectidas em grande escala na base da chaminé, comportando-se este dispositivo como um reservatório de entrega final, relativamente ao troço da conduta entre a bomba e a chaminé. Tal fenómeno permite analisar isoladamente os efeitos do golpe de aríete neste troço, naturalmente mais curto que a totalidade da conduta (Stephenson, 1989).

As variações de caudal ocorrem de forma mais gradual no troço da conduta, entre a chaminé de equilíbrio e o reservatório de jusante, quando comparado com o que se verifica no troço entre a bomba e a chaminé. Esta atenuação é promovida pela flutuação do nível de líquido no interior da chaminé, estabelecendo-se entre esta e o reservatório de jusante um escoamento do tipo oscilação em massa (ver Capítulo 3.4). Quando tal acontece, os efeitos elásticos são, geralmente, desprezáveis. A chaminé de equilíbrio permite, portanto, proteger de forma directa, o troço da conduta onde se estabelece a oscilação em massa (chaminé-reservatório de jusante), atenuando as respectivas variações de pressão. Indirectamente permite, também, proteger o troço onde ocorrem os efeitos elásticos (bomba-chaminé), através do efeito de diminuição da conduta não protegida (Almeida, 1982).

As flutuações do nível do líquido no interior de uma chaminé de equilíbrio são amortecidas através das perdas de carga contínuas e localizadas. Uma forma comum de conseguir o aumento da perda de carga consiste na instalação de um dispositivo de estrangulamento na base da chaminé. Stephenson (1989), no entanto, alerta para a possibilidade de resultarem maiores amplitudes de variação da pressão na conduta, decorrentes do excesso de perda de carga provocado pelo estrangulamento da base do reservatório bidireccional.

Abecasis (1979), além do tipo de dispositivo analisado em cima, descreve um conjunto de configurações possíveis para execução de câmaras de equilíbrio, entre as quais figuram a chaminé descarregadora, a chaminé diferencial e a chaminé com câmaras de expansão. Estas variantes são, no entanto, mais apropriadas para instalação em centrais hidroeléctricas, não estando, assim, enquadradas no âmbito do presente trabalho.

A opção pela instalação de chaminés de equilíbrio, normalmente, envolvendo estruturas de grande dimensão, constitui um impacto esteticamente desfavorável no meio ambiente.

5.3.2. RESERVATÓRIO UNIDIRECCIONAL (RUD)

Os reservatórios unidireccionais (RUD) são dispositivos que permitem evitar a ocorrência local de pressões negativas, através da cedência temporária de água. As condições de exploração deste reservatório são feitas de forma isolada, relativamente à conduta elevatória.

Um RUD é constituído por um reservatório de dimensões inferiores a uma chaminé de equilíbrio, em que a ligação à conduta elevatória é feita por uma tubagem provida de uma válvula de retenção, impedindo que o escoamento se processe da conduta para o interior do reservatório. Ramos (1979), citando Parmakian (1985), refere que a conduta de ligação entre o reservatório unidireccional e a conduta elevatória a proteger deverá dispor de um diâmetro compreendido entre metade e um terço do diâmetro daquela. O nível do líquido no interior do reservatório é mantido através de uma conduta de alimentação de pequeno diâmetro, em “by-pass”, e controlado por uma válvula de flutuador como a exposta na Figura 5.17.

Figura 5.17. Válvula de Flutuador (Catálogos Técnicos AVK, 2004)

Na Figura 5.18 apresenta-se um esquema típico da instalação de um reservatório unidireccional, em sistemas elevatórios.
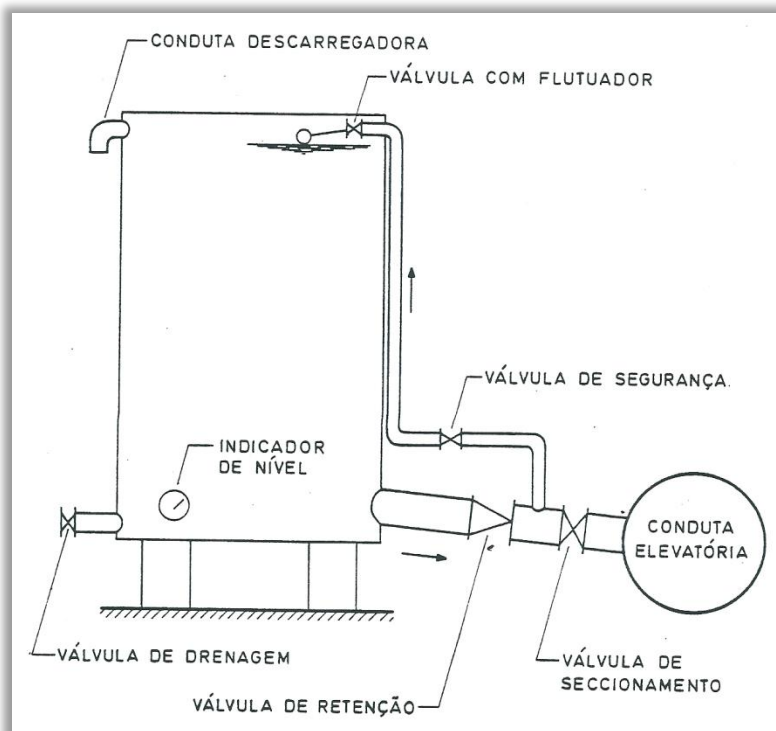
Figura 5.18. Esquema tipo de instalação de um reservatório unidireccional (Almeida, 1990)

Após paragem do grupo electrobomba de um sistema elevatório, a alimentação da conduta elevatória por parte do RUD só tem início, quando a linha piezométrica, que se encontra em queda, cruza o nível do líquido no interior do reservatório. Nesta altura, a válvula de retenção abre e o líquido armazenado no RUD escoa para a conduta, compensando a redução de caudal fornecido pela bomba. Deste modo, poderá ser evitado o fenómeno de rotura da veia líquida nos pontos altos da conduta elevatória, ou nas secções adjacentes à bomba. É, portanto, junto a essas secções da conduta elevatória que o dispositivo deve ser instalado (Thorley, 2004).

Na fase de inversão do sentido de escoamento, a acção do RUD é interrompida, através da válvula de retenção que impede o escoamento no interior do reservatório. Assim, este dispositivo não terá, directamente, qualquer efeito atenuante nas sobrepressões consequentes.

Almeida (1982) frisa a importância na localização do RUD na eficiência da sua protecção a um sistema elevatório, referindo que este dispositivo só é eficaz nas secções da conduta elevatória próximas do ponto de inserção do mesmo. O autor menciona ainda que o nível da água no interior do RUD deverá estar tão próximo quando possível da linha piezométrica, correspondente ao regime permanente, para, com isto, garantir maior rapidez na resposta aos efeitos do golpe de aríete.

Os reservatórios unidireccionais podem ser construídos em alvenaria ou betão. No entanto, também existem dispositivos de corpo pré-fabricado, em que a estrutura é de natureza metálica ou plásticos reforçados para resistir ás acções mecânicas.

Na Figura 5.19 apresenta-se um RUD instalado numa estação elevatória de águas residuais no concelho de Anadia, para protecção das depressões nas secções da conduta junto aos grupos electrobomba. Este dispositivo apresenta um volume total de 2 m^3 e a conduta elevatória DN450 é alimentada, a partir do RUD, por uma tubagem com uma dimensão nominal 400. Uma vez que se trata de uma instalação de águas residuais, o enchimento do RUD, após a fase de alimentação da conduta elevatória, é feito com água da rede pública de abastecimento, sendo este processo controlado por duas sondas de nível instaladas no interior do reservatório e por uma electroválvula na tubagem de enchimento.

Figura 5.19. Reservatório unidireccional instalado no Sistema Elevatório 3 de Águas Residuais de Avelãs de Caminho (Cortesia de SMAS de Anadia, 2011)

Além de implicarem instalação de acessórios suplementares e da dificuldade em proteger secções da conduta afastadas do seu ponto de inserção, os RUD apresentam o inconveniente de ser necessário aguardar algum tempo para tornar a arrancar a bomba, de forma a garantir o enchimento completo do reservatório (após uma ocorrência de um regime transitório, resultante da saída de serviço da bomba).

5.3.3. RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO (RAC)

Actualmente, um dos dispositivos mais utilizados para protecção de sistemas elevatórios, contra os efeitos dos regimes transitórios, é o reservatório de ar comprimido (RAC).

Quando o perfil de uma conduta elevatória não é suficientemente próximo do nível do líquido do reservatório de montante, para prever a instalação de reservatórios unidireccionais ou chaminés de equilíbrio, o fornecimento de água à conduta, quando ocorrem depressões resultantes da paragem da bomba, pode ser conseguido recorrendo a um RAC. Este dispositivo é constituído por uma câmara fechada, contendo ar comprimido na parte superior e água a ocupar a zona inferior. O controlo e a manutenção de uma determinada de massa de ar, no interior do reservatório, são feitos com recurso a um manómetro e um compressor, respectivamente. Na Figura 5.20 são apresentados os principais componentes de um reservatório de ar comprimido.
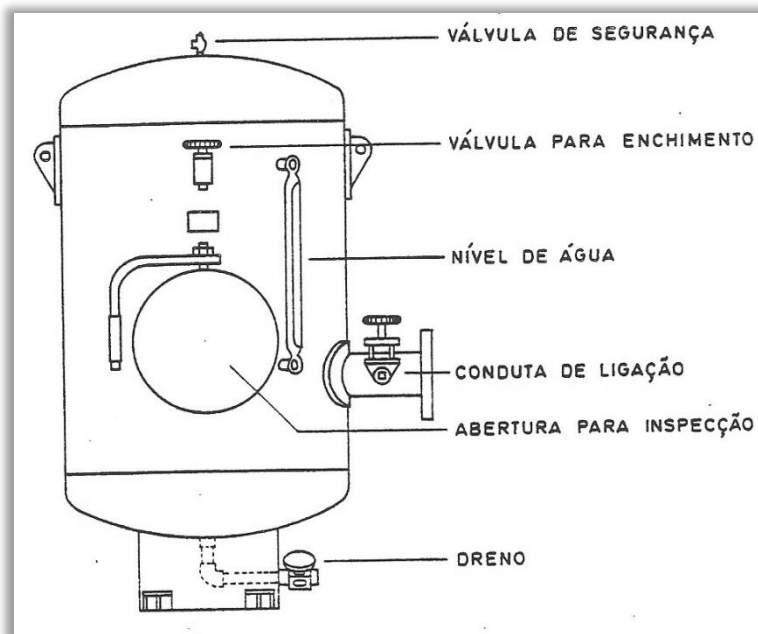
Figura 5.20. Representação esquemática de um reservatório de ar comprimido (Almeida, 1982)

Em regime permanente, a massa de água armazenada no interior do RAC encontra-se em equilíbrio, sob a acção da pressão do ar que ocupa a zona superior do dispositivo e a pressão na secção da conduta onde se estabelece a ligação. Este equilíbrio é quebrado devido às variações de pressão, decorrentes de um regime transitório. Com a queda de pressão, logo após saída de serviço da bomba, parte do volume de água armazenado no reservatório é escoado para a conduta, reduzindo o tempo de variação de caudal. Na fase posterior, quando o sentido de escoamento é invertido e a pressão aumenta, o reservatório irá absorver, total ou parcialmente, o caudal da conduta (esta situação também se verifica nos instantes após o arranque do grupo electrobomba).

Durante a fase de depressão e de alimentação da conduta, a pressão do ar no interior do reservatório diminui, permitindo a sua expansão e, com isto, o volume ocupado pelo ar aumenta. Pelo contrário, durante a fase de sobrepressão e de armazenamento de água no RAC, o volume ocupado pelo ar diminui, como consequência do aumento da respectiva pressão.

O volume deste tipo de dispositivos de protecção é mais pequeno que o volume das chaminés de equilíbrio. Tal facto deve-se à substituição da mobilização da energia potencial gravítica (caso da chaminé de equilíbrio) pela mobilização da massa de ar como acumulador de energia (Almeida, 1982).

De forma a obter volumes ainda mais pequenos dos reservatórios de ar comprimido e a reduzir os efeitos das variações máximas de pressão, podem ser introduzidas perdas de carga adicionais na tubagem de ligação entre o RAC e a conduta elevatória. Para alcançar esse fim pode-se, por exemplo, instalar uma válvula de retenção na referida tubagem de ligação, e uma tubagem de by-pass, com diâmetro reduzido, que permita o reenchimento do RAC, quando o obturador da válvula de retenção fecha, na sequência da inversão do sentido do escoamento (Anspach, 1979). Na Figura 5.21 é apresentado um esquema usual de instalação de um reservatório de ar comprimido, para protecção de um sistema elevatório contra os efeitos do golpe de aríete, provida de tubagem de by-pass.
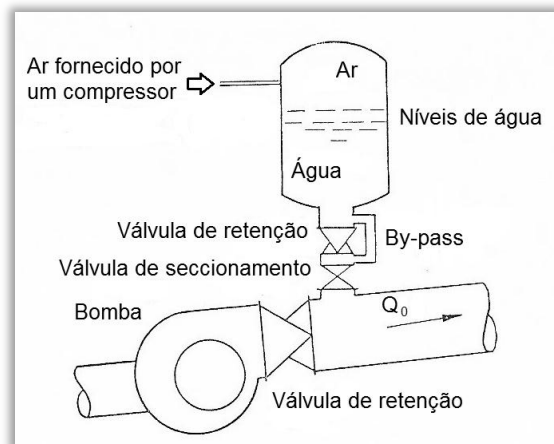
Figura 5.21. Esquema típico de instalação de um reservatório de ar comprimido, provido de by-pass (Adaptado de Stephenson, 1989)

Lencastre (1996) refere outras soluções para introdução de perda de carga adicional, a instalar na tubagem de ligação do RAC à conduta, como a instalação de um tubo curto, tipo borda (também designado como tubeira) ou um “clapet” perfurado (Figura 5.22).
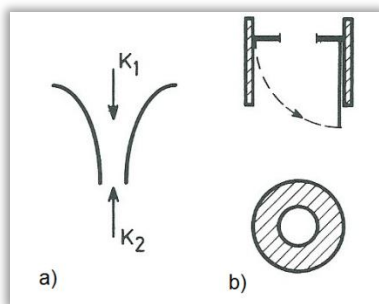
Figura 5.22. Representação de uma tubeira (a) e um “clapet” perfurado (b) (Lencastre, 1996)

Estes acessórios apresentam a particularidade de produzir uma perda de carga assimétrica, ou seja, maior quando o escoamento se processa no sentido da conduta para o reservatório e menor no sentido inverso.

Parmakian (1963), a título sugestivo, refere que a perda de carga, quando o escoamento se processa no sentido do RAC, deverá ser 2,5 vezes superior à perda de carga na saída do líquido do reservatório, para a conduta principal.

Os reservatórios de ar comprimido apresentam alguns inconvenientes, como a necessidade de um compressor de ar em permanência e respectivos dispositivos de controlo da pressão, implicando um investimento inicial avultado, e a eventual influência negativa no fecho da válvula de retenção de protecção da bomba, podendo provocar o fecho brusco e violento do obturador, fenómeno internacionalmente, conhecido pelo termo “check valve slam”.

Figura 5.23. Reservatório de ar comprimido (Cortesia de Adductio, 2011)

Apesar de serem utilizados apenas na protecção de sistemas hidroeléctricos, indica-se, a título de curiosidade, que existem reservatórios de ar comprimido de grandes dimensões, para protecção contra os regimes transitórios, conhecidos como “Air Cushion Surge Chambers”, construídos com volumes entre 2 000 e 110 000 m^3. Estes reservatórios são galerias escavadas em rochas, no interior das quais, a almofada de ar ocupa entre 25 a 85% do volume total da câmara, a pressões que podem variar entre 20 a 40 bar. O nível da água no interior da galeria pode variar entre 2 a 5 metros de altura, em relação ao fundo da mesma (Palmstrom, 2008). Na Figura 5.24 apresenta-se um esquema genérico com um reservatório de ar comprimido deste tipo, construído numa montanha, para protecção de uma estação hidroeléctrica contra o golpe de aríete.
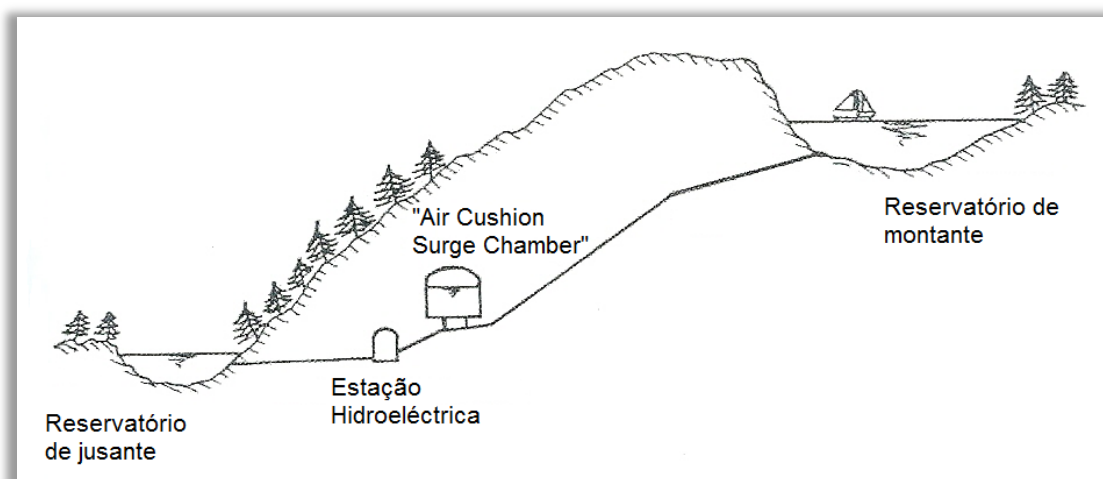
Figura 5.24. Esquema de instalação de um Reservatório de Ar Comprimido de grandes dimensões do tipo “Air Cushion Surge Chamber” (Adaptado de Thorley, 2011)

Na exploração de sistemas com este tipo de reservatórios de ar comprimido, o maior problema reside na dificuldade em manter o nível de ar comprimido, devido as fugas que acontecem pelas fissuras das paredes da galeria.

5.3.4. ACUMULADOR OU RESERVATÓRIO DE MEMBRANA

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidas diversas variantes do tradicional reservatório de ar comprimido, algumas delas com bastante aceitação por parte dos projectistas e entidades ligadas à exploração de sistemas elevatórios de água e águas residuais. A variante mais conhecida é o reservatório de membrana e pode ser utilizado tanto em água tratada, como também em águas residuais (Figura 5.25).
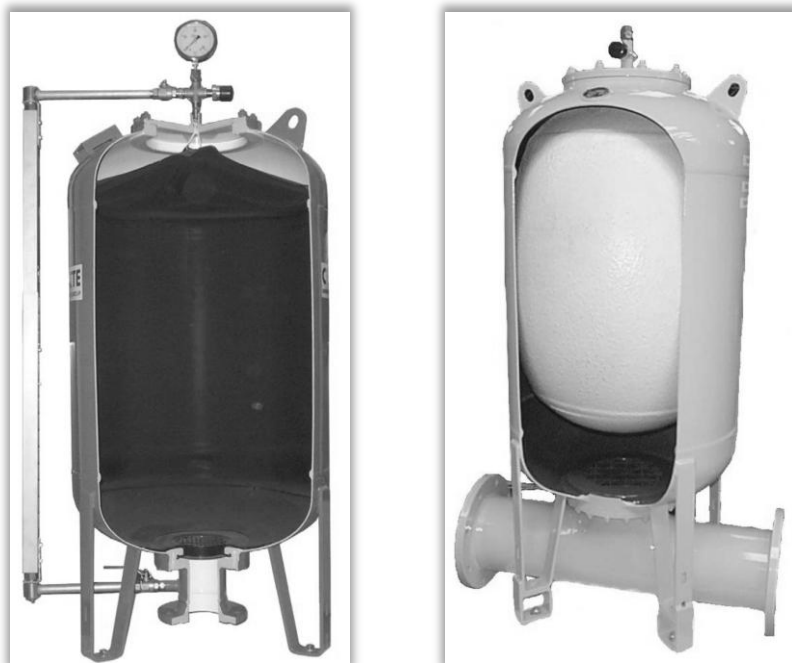
Figura 5.25. Exemplos de reservatórios de membrana próprios para águas residuais (esq.) e para água potável (dir.) (Catálogos Técnicos Charlatte, 2011)

O dimensionamento dos reservatórios de membrana, tal como acontece com os reservatórios de ar comprimido tradicionais, é baseado na determinação da pressão interna necessária para garantir a alimentação da conduta elevatória principal, na fase de depressão que se segue à paragem da bomba. Neste tipo de reservatórios não há contacto entre o líquido e a massa de ar no seu interior, prevenindo-se, assim, a dissolução do ar no líquido. Desta forma não há necessidade de ter, em permanência, um compressor para controlar a massa de ar no interior do reservatório.

Apesar de partilharem os mesmos princípios elementares de acção, os reservatórios apresentados na Figura 5.25 apresentam diferenças no funcionamento de alguns componentes, consoante a natureza do líquido a transportar pelo sistema elevatório a proteger contra o golpe de aríete. No caso do dispositivo de características indicadas para águas de abastecimento (equipamento à esquerda), a água no reservatório encontra-se no interior de uma membrana elástica, ficando o ar na zona superior do reservatório, entre a membrana e o corpo do mesmo. Em instalações de águas residuais, o fabricante em causa propõe a utilização de um dispositivo do género daquele que se apresenta do lado direito. Nesse equipamento, o ar encontra-se no interior de uma membrana, enquanto o líquido ocupa o espaço entre esta e as paredes metálicas do reservatório.

Relativamente ao comportamento do reservatório de membrana que o fabricante em causa propõe, para utilização em sistemas elevatórios de água potável, apresenta-se um diagrama sequencial de todo o processo que se segue à paragem dos grupos electrobomba (Figura 5.26).
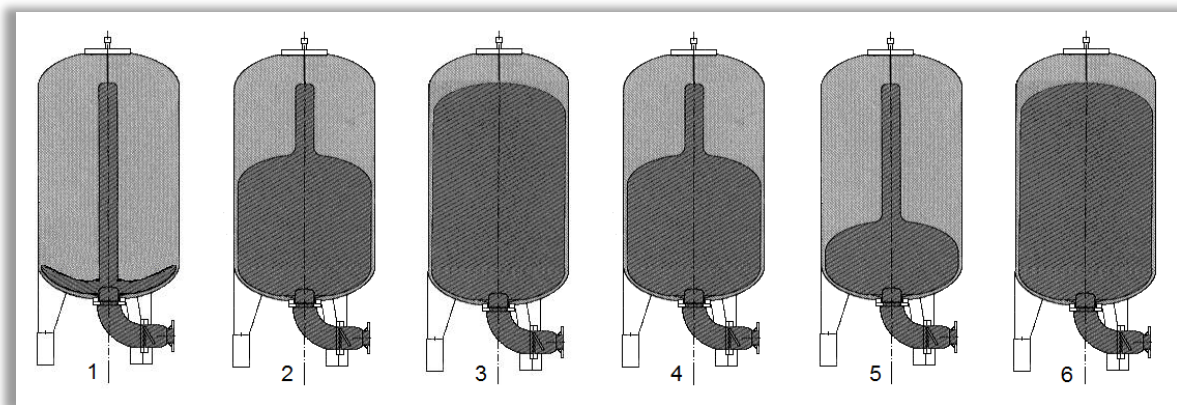
Figura 5.26. Comportamento do reservatório de membrana, próprio para água de abastecimento, durante um regime transitório (Catálogos Técnicos Charlatte, 2006)

Inicialmente, o reservatório é carregado com ar comprimido ou azoto, para uma determinada pressão, obtida através da análise do golpe de aríete. Nesta altura, a membrana está vazia, ocupando um volume nulo (1). Quando a bomba arranca, a água entra no reservatório, de acordo com a pressão fornecida pela bomba ao escoamento (a energia fornecida pela bomba é sempre superior à pressão do ar comprimido ou azoto, no interior do reservatório) (2). A água que entra na membrana do reservatório vai provocar um efeito de compressão no ar ou gás carregado, até que seja alcançado um equilíbrio de pressão entre a massa líquida e a gasosa (3). Após paragem da bomba, a pressão na conduta elevatória principal começa a decrescer e a energia elástica no interior do reservatório provoca a alimentação da conduta. Este processo protege a conduta das pressões mínimas (4). Na fase de inversão do sentido do escoamento na conduta elevatória principal, a água torna a entrar no reservatório (onde o ar ou azoto no seu interior sofreu uma descompressão). Caso se verifique necessário, a entrada de água no reservatório deverá ser por uma tubagem de “by-pass” de pequeno diâmetro ou outro dispositivo que introduza uma perda de carga no escoamento. Várias flutuações poderão ocorrer até que se atinja uma condição de natureza estática no sistema (5). Quando a bomba tornar a arrancar, o reservatório continuará a encher de água, até que se atinjam as condições de regime permanente. Nesta altura o reservatório de membrana estará preparado para uma nova acção de protecção contra o golpe de aríete.

No que diz respeito aos reservatórios de membrana, próprios para aplicações em águas residuais, a sequência de processos que ocorrem após saída de serviço da bomba de um sistema elevatório, é apresentada na Figura 5.27.
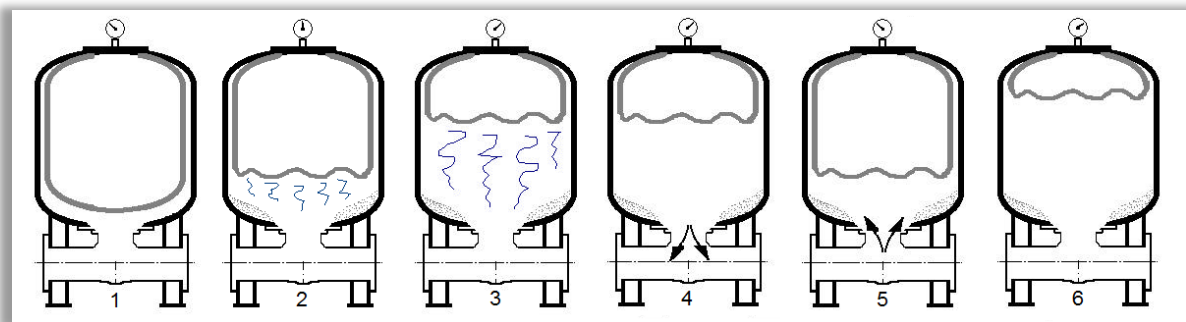
Figura 5.27. Comportamento do reservatório de membrana, próprio para águas residuais, durante um regime transitório (Catálogos Técnicos Charlatte, 2006)

De forma semelhante ao caso analisado antes, o reservatório, neste caso a membrana, é carregada com ar ou gás, à pressão de cálculo. A sequência de processos na intervenção de protecção da conduta contra os efeitos dos regimes transitórios também é a mesma. No entanto, por conter no seu interior o gás (no caso anterior continha o líquido), a variação do volume ocupado pela membrana, ao longo de todo o processo, acontece de forma inversa, ao que se verificou na situação do reservatório para aplicação em águas de abastecimento.

Na Figura 5.28 pode observar-se um reservatório de membrana, instalado numa estação elevatória de águas residuais do concelho de Paredes. Este dispositivo tem um volume nominal de 0,4 m^3 e protege uma conduta DN160, essencialmente, contra os efeitos da depressão, que se fazem sentir em, praticamente, toda a extensão da conduta elevatória (cerca de 1 200 metros). A ligação do reservatório de membrana é feita ao circuito de compressão das bombas, que antecede a conduta elevatória, através de uma tubagem DN100 (fotografia à direita).

Figura 5.28. Reservatório de membrana instalado no Sistema Elevatório de Águas Residuais de Vandoma (Cortesia de Veolia-Águas de Paredes, 2011)

Além de não necessitarem de um compressor em permanência, estes reservatórios têm outra grande vantagem em termos de exploração, uma vez que a membrana é, geralmente, substituível no local, dispensando, em caso de danificação da mesma, o seu transporte para a fábrica.

5.3.5. RESERVATÓRIO HIDROPNEUMÁTICO COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE AR

Com o intuito de conjugar as vantagens do reservatório de ar comprimido e do reservatório unidireccional, foi desenvolvido um dispositivo de protecção com características mistas, o reservatório hidropneumático com alimentação automática de ar (RHAAA). Um exemplo deste tipo de equipamento é apresentado na Figura 5.29.

Figura 5.29. Exemplo de um reservatório hidropneumático de alimentação automática de ar, RHAAA (Catálogos Técnicos Charlatte, 2006)

Este dispositivo consiste, essencialmente, num reservatório fechado e provido de uma válvula especial do tipo ventosa (ver Capítulo 5.3.8). Esta válvula permitirá a admissão de ar quando a pressão no interior do reservatório for inferior à pressão atmosférica e a saída do mesmo, quando a pressão no reservatório aumentar, sendo dificultada a saída de água para o exterior. O tipo de válvula ou dispositivo instalado para saída de ar podem variar. Durante o regime permanente também pode ou não ser admitido um determinado volume de ar no interior do reservatório (Almeida, 1990).

Os RHAAA beneficiam da dispensa de compressores de ar, sendo a admissão de ar conseguida de forma automática pela válvula de alimentação de ar instalada.

Na Figura 5.30 apresenta-se um diagrama sequencial do comportamento de um RHAAA do género do reservatório indicado na Figura 5.29, nos instantes que se seguem à paragem do grupo electrobomba de um sistema elevatório e consequente golpe de aríete. No modelo referido, o topo do reservatório possui uma câmara de compressão, limitada pelo tubo central de ventilação, que é provido de uma válvula de obturador flutuante de fecho do orifício de contacto com o exterior.
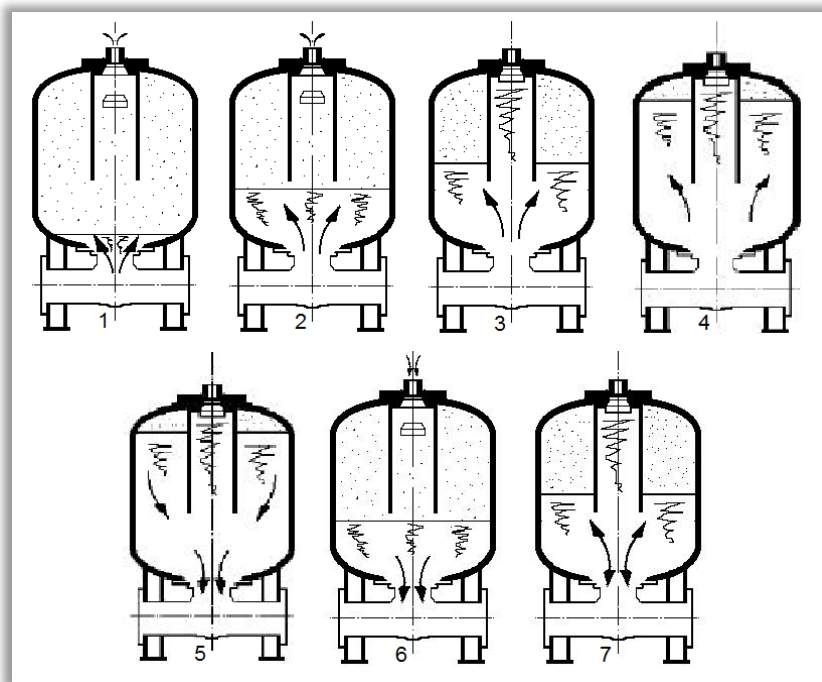
Figura 5.30. Comportamento de um RHAAA, durante a ocorrência de um regime transitório em pressão (Catálogos Técnicos Charlatte, 2006)

Comportamento do dispositivo no arranque do grupo electrobomba

Com o arranque da bomba, a conduta elevatória enche e começa a alimentar o reservatório de protecção contra o golpe de aríete. Nesta altura, o ar contido no interior deste dispositivo é expulso, uma vez que a válvula de obturador flutuante está aberta, comportando-se como uma ventosa (1). A conduta elevatória continua o seu processo de enchimento e a água também continua a entrar para o RHAAA, simultaneamente à expulsão do ar no ser inteiro, enquanto a válvula permanece aberta. O nível de líquido sobe até alcançar o fundo da tubagem central de ventilação que limita a câmara de compressão (2). O nível do líquido continua a subir ao longo da tubagem central e a válvula ainda continua aberta para a atmosfera. No entanto, o ar contido entre o corpo do reservatório e as paredes da conduta central é comprimido. Com a continuação da subida do nível do líquido, o flutuador é empurrado para o limite superior da conduta central até provocar o fecho da válvula (3). À medida que a pressão aumenta, o ar retido no interior do reservatório é comprimido, até ser atingida uma condição de equilíbrio. Durante o regime permanente não há transferências de qualquer natureza, do reservatório com o exterior, porque a válvula mantém-se fechada (4).

Comportamento do dispositivo após a paragem do grupo electrobomba

Imediatamente após paragem da bomba, a pressão na conduta elevatória começa a baixar e a energia elástica do gás descarrega o líquido do interior do RHAAA para a conduta. O processo de fornecimento de energia à conduta provoca a atenuação da queda de pressão verificada na mesma. Quando o nível da água no interior do reservatório descer abaixo do fundo da tubagem central de ventilação, a válvula abre (5). O interior do reservatório encontra-se agora em contacto com o exterior, pelo que a alimentação da conduta será feita à pressão atmosférica. O nível da água continua a descer na câmara, até ser atingido o nível mínimo, altura coincidente com a chegada do caudal de retorno à secção de inserção do RHAAA na conduta (6). O processo de flutuação continua com, cada vez, menor intensidade devido ao efeito das perdas de carga. Após algumas repetições cíclicas, as condições estáticas são atingidas. A almofada de ar no interior do reservatório será comprimida com um novo arranque do grupo e a energia elástica armazenada está agora preparada para fazer face a uma nova paragem da bomba (7)

Da análise efectuada antes, pode-se inferir que o RHAAA comporta-se como um RUD, durante a fase de depressão e como um RAC na fase de sobrepressão.

O RHAAA tem especial utilidade em sistemas elevatórios, que envolvem pequenas alturas de elevação, os quais tendem a exigir elevados volumes para um RAC (Almeida, 1990).

5.3.6. CONDUTA DE ASPIRAÇÃO PARALELA OU "BY-PASS"

Geralmente, a instalação de reservatórios de ar comprimido (RAC) para protecção de uma conduta elevatória contra os efeitos das depressões máximas, causados pela paragem da bomba, envolve um investimento económico inicial avultado. Em algumas situações, a instalação de um sistema de "by-pass" ao grupo electrobomba, pode resultar numa solução menos onerosa e igualmente eficiente. Na Figura 5.31 é esquematizada uma disposição possível dos acessórios inerentes a uma solução deste tipo.
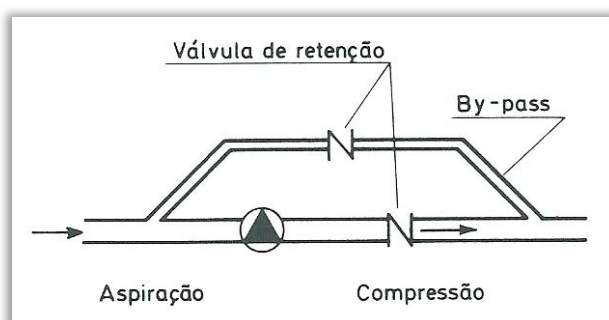
Figura 5.31. Instalação típica de um sistema de "by-pass" ao grupo electrobomba para protecção contra os efeitos do golpe de ariete (Adaptado de Lencastre, 1996)

Considere-se o caso de um pequeno sistema elevatório, onde a altura de elevação da bomba é reduzida, tal como a representação esquemática exposta na Figura 5.32.
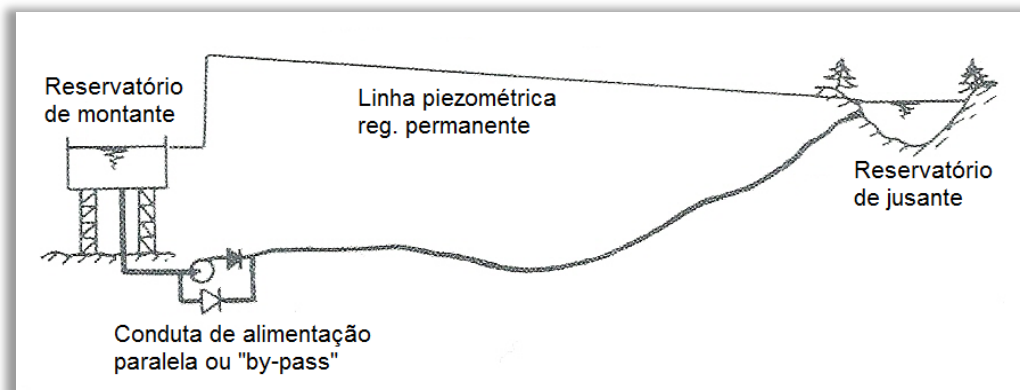
Figura 5.32. Sistema de "by-pass" numa instalação de bombagem, para pequena altura de elevação (Adaptado de Thorley, 2004)

De forma idêntica às situações analisadas até aqui, considera-se uma situação de paragem do grupo electrobomba, com consequente redução de caudal e da pressão a jusante da secção da bomba.

A instalação de uma conduta de aspiração paralela, como representado na Figura 5.32, permite criar um circuito alternativo entre o reservatório de aspiração e a conduta elevatória, a jusante da bomba. Este circuito alternativo ou "by-pass" garantirá a alimentação da conduta elevatória principal, com caudal suplementar, enquanto a cota piezométrica instantânea na secção de jusante da conduta paralela for inferior à cota piezométrica da secção de montante da mesma. Deste modo, consegue-se prolongar o tempo de anulação de caudal e, consequentemente, atenuar a amplitude da depressão máxima verificada na secção de jusante da conduta de "by-pass". O mecanismo em causa é tanto mais eficiente, quanto menor for a perda de carga introduzida pela conduta de aspiração paralela. A instalação de uma válvula de retenção nesta conduta impede o retorno do líquido para interior do reservatório de montante.

Para as mesmas condições decorrentes da paragem do grupo, refere-se que, em sistemas de bombagem que envolvem grandes alturas de elevação, o tempo que a linha piezométrica demora a cruzar o nível do reservatório de montante, pode ser demasiado longo, retardando o início da alimentação da conduta principal através do "by-pass". Deste modo, este mecanismo não é eficaz na protecção de instalações de bombagem para grande desnível entre o reservatório de aspiração e o de reservatório de entrega, principalmente nos pontos altos e intermédios das respectivas condutas forçadas.

As condutas de aspiração paralela não permitem, no entanto, a protecção directa de um sistema elevatório contra os efeitos das sobrepressões. Além disso, o facto do nível de líquido no interior do reservatório ter, necessariamente, que ser superior à cota do eixo da conduta junto à secção das bombas, representa uma limitação significativa.

5.3.7. VÁLVULA DE ALÍVIO

As válvulas de alívio, também designadas como válvulas de descarga automática permitem a saída de água da conduta a proteger e controlar pontualmente as pressões extremas. Existem diversos tipos de válvulas de alívio, com diferentes graus de complexidade e acessórios.

Num sistema elevatório, após paragem do grupo electrobomba, dá-se, na fase inicial, uma redução de caudal e, consequente redução da pressão (depressão máxima). Posteriormente, associada à desaceleração brusca do escoamento de retorno, provocada pelo fecho da válvula de retenção a jusante do grupo, verifica-se um aumento mais ou menos significativo da pressão (sobrepressão máxima). Outra situação de princípio semelhante é a sobrepressão gerada pela desaceleração súbita decorrente da colisão de duas colunas líquidas, em pontos altos de uma conduta, onde ocorre rotura da veia líquida. As válvulas de alívio proporcionam a introdução de uma força de aceleração do líquido, através a expulsão do mesmo para o exterior e, com isso, a redução da amplitude das sobrepressões (Almeida, 1990). Na Figura 5.33, apresenta-se um exemplo de uma válvula de descarga automática.
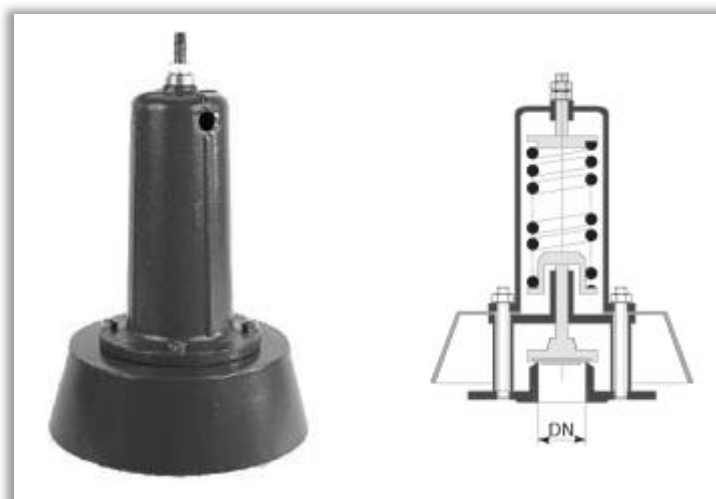
Figura 5.33. Válvula de descarga automática (Catálogos Técnicos Saint-Gobain PAM, 2006)

Estes dispositivos não oferecem qualquer protecção contra os efeitos das depressões, não evitando, portanto, a ocorrência de fenómenos de cavitação e rotura da veia líquida.

A extensão do efeito de protecção, conferido pelas válvulas de alívio, resume-se a pouco mais que a secção da conduta elevatória onde são instaladas. Desta forma, estes dispositivos devem ser colocados nos pontos de maior susceptibilidade para ocorrência de sobrepressões elevadas, geralmente, na secção de jusante da válvula de retenção do grupo electrobomba e nos pontos altos da conduta elevatória. A sua eficácia é tanto maior, quando maior for a capacidade de vazão do dispositivo.

Stephenson (1989) refere que este método de protecção contra o golpe de aríete é, geralmente, mais económico em instalações de bombagem que envolvem maiores alturas de elevação, pois proporcionam o recurso a válvulas de menor dimensão.

Estas válvulas apresentam alguns inconvenientes, entre os quais a necessidade de manutenção periódica e de um sistema para recolha e drenagem da água descarregada.

5.3.8. VENTOSA

As ventosas, na sua função de admissão de ar, constituem um mecanismo que, em determinadas situações, proporciona a atenuação dos efeitos das depressões transitórias, nomeadamente, da ocorrência de pressões mínimas abaixo da tensão de vapor. A utilização das ventosas, na protecção contra os regimes variáveis, tem como finalidade a admissão de ar para a conduta elevatória, de modo a formar uma almofada de amortecimento. Estas almofadas permitem atenuar as variações de pressão durante um dado período de tempo, após o qual o ar é lentamente libertado da conduta. Torna-se, portanto, importante que a almofada de ar permaneça no mesmo local de formação e não se desloque para outro ponto da conduta.
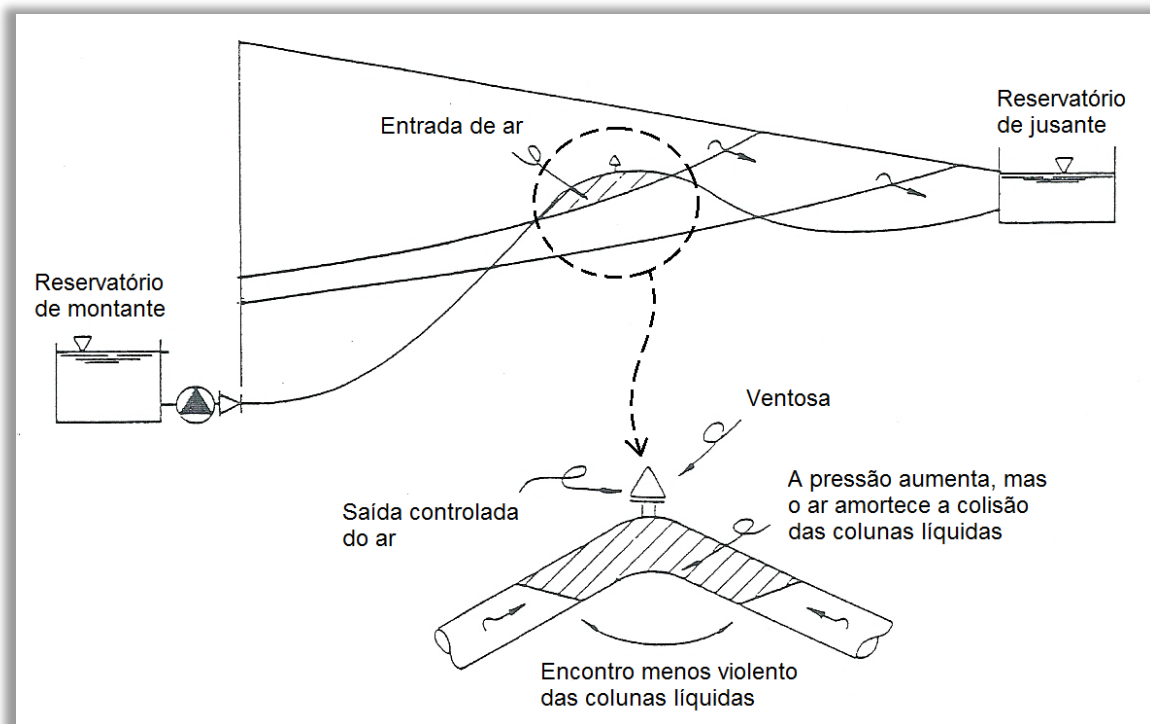
Figura 5.34. Comportamento de uma ventosa de duplo efeito, durante o golpe de aríete (Adaptado de Almeida, 1990)

À semelhança do que se verifica nos RUD, após paragem da bomba, as válvulas de alívio apenas iniciam a sua acção de protecção, quando a linha piezométrica descer a um nível inferior ao do perfil da conduta elevatória.

Com a função de protecção contra o golpe de aríete, as ventosas são, usualmente, instaladas nos pontos altos das condutas elevatórias e onde a inclinação de implantação da conduta é muito reduzida. Como estes pontos representam locais onde as ventosas seriam, naturalmente, instaladas para libertação de ar durante o processo de enchimento da conduta, uma das diversas variantes deste equipamento poderia ser utilizada. As ventosas podem ser de simples, duplo ou triplo efeito, consoante permitem a expulsão de pequenas quantidades de ar, a expulsão e admissão (em situações de depressão na conduta) de pequenas quantidades de ar ou, somado a estas duas últimas funções, a expulsão de grandes volumes de ar (Figura 5.35).
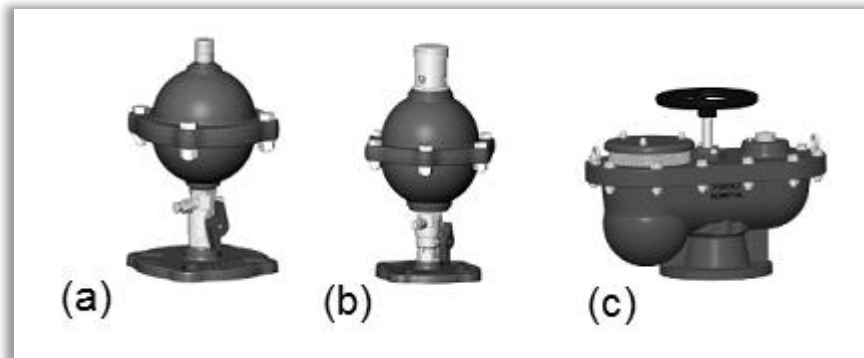
Figura 5.35. Exemplos de ventosas de simples (a), duplo (b) e tripo efeito (c) (Catálogos Técnicos Fucoli-Somepal, 2011)

Thorley (2004) aconselha a utilização de válvulas de admissão de ar, apenas em sistemas envolvendo baixas alturas de elevação, em secções da conduta com uma diferença até 5 metros da linha piezométrica característica do regime permanente e em sistemas de velocidade de escoamento baixa.

O mesmo autor refere que, em poços de aspiração profundos, com bombas submersíveis, a instalação de uma ventosa, antecedida de uma válvula reguladora de pressão, constitui um método bastante eficaz na protecção da tubagem de compressão vertical de cada grupo. Quando as bombas estão paradas, a tubagem vertical de compressão individual dos grupos pode estar total ou parcialmente em condições de vácuo. Com o arranque das bombas, pode correr-se o risco de se verificar uma situação de funcionamento para o seu caudal máximo característico e para uma altura manométrica nula. Ao permitir a entrada de ar para a tubagem vertical, quando a pressão é inferior à pressão da conduta, na secção de jusante da válvula de retenção e, fechado de forma gradual a válvula de regulação de pressão, inicialmente aberta, o escoamento na conduta elevatória principal pode ser estabelecido de uma forma controlada. Na Figura 5.36, apresenta-se um esquema de uma instalação do tipo da descrita antes.
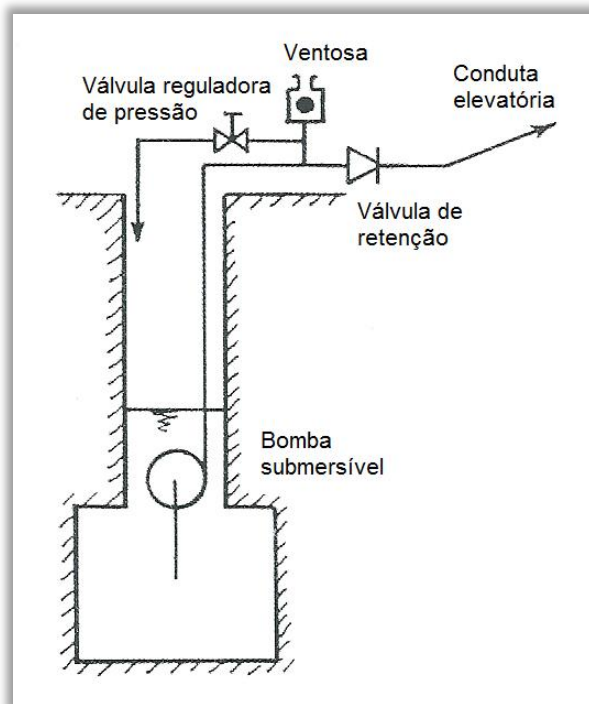
Figura 5.36. Esquema de instalação de uma válvula de regulação de pressão e de uma ventosa em poços de aspiração profundos, com bombas submersíveis (Adaptado de Thorley, 2004)

5.4. SELECÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTECÇÃO

Num sistema elevatório, a escolha do melhor método de protecção contra os efeitos do golpe de aríete depende das características físicas e hidráulicas do próprio sistema.

O ideal seria conseguir evitar as variações bruscas nas condições do escoamento, no entanto, em grande parte dos sistemas elevatórios, tal não é possível. Nestas situações, para evitar os efeitos do golpe de aríete, será necessário proceder a alterações nos processos de funcionamento do sistema elevatório, definidos inicialmente.

Porque não há casos iguais, cada sistema elevatório tem, necessariamente que ser estudado como um caso particular, embora os princípios básicos que regem a protecção contra as variações máximas de pressão sejam idênticos.

O processo de escolha do dispositivo de protecção deve ser iniciado através de um levantamento e análise de todas causas possíveis da ocorrência dos regimes transitórios, incluindo as situações normais (paragem e arranque dos grupos electrobomba) e situações de emergência (funcionamento inadequado dos dispositivos de protecção ou uma rotura na conduta).

Posteriormente devem ser assinaladas as secções da conduta, de origem provável das perturbações nas condições do escoamento e deve ser analisada a possibilidade de adoptar algumas das medidas de acção directa, mencionadas nos capítulos anteriores. Se a adopção destas medidas constituir uma

forma de prevenir os efeitos do golpe de aríete, talvez possa ser dispensada a instalação de dispositivos de protecção (situação pouco frequente).

Segundo Ramos (1979), no processo selecção dos dispositivos de protecção, o parâmetro de maior influência é o parâmetro da conduta. O valor deste parâmetro é dado pela expressão:

$$\rho^* = \frac{cV_0}{gH_0} \tag{5.5}$$

Em que c representa a celeridade das ondas elásticas, V_0 a velocidade de escoamento em regime permanente, g a aceleração da gravidade e H_0 a altura manométrica.

Stephenson (1989) apresenta uma tabela de apoio à decisão do dispositivo a adoptar. Nessa tabela são apresentados, de forma aproximada e decrescente de custo, alguns dos dispositivos mais conhecidos (Tabela 5.2).

Tabela 5.2. Resumo dos métodos de protecção contra o golpe de aríete (Adaptado de Stephenson, 1989)

MÉTODO DE PROTECÇÃO (EM ORDEM CRESCENTE DE CUSTO)	VARIÁVEIS QUE DEFINEM A SUA ESCOLHA	OBSERVAÇÕES
Volante de inércia	$\frac{In^2}{\rho ALH_0^2} > 0{,}01$	Só de forma bastante aproximada.
Válvula de retenção associada a uma conduta de "by-pass"	$\rho^* = \frac{cV_0}{gH_0} \gg 1$	Alguma água poderá também ser aspirada pela bomba.
Válvula de retenção associada à conduta elevatória principal	$\frac{cV_0}{gh} > 1$	Normalmente utilizada conjuntamente com outros dispositivos de protecção. Não evita a rotura da veia líquida.
Chaminé de equilíbrio	h pouco significativo	O perfil da conduta elevatória deve ser próximo da linha piezométrica, de forma a evitar estruturas muito altas.
Válvula de descarga automática	$\rho^* = \frac{cV_0}{gH_0} \ll 1$ $\frac{2L}{c} > 5\ seg$	O perfil da conduta deve ser convexo para jusante. Há probabilidade de ocorrer rotura da veia líquida.
Reservatório unidireccional	$\frac{cV_0}{gh} > 1$	h representa a carga sobre o reservatório. O perfil da conduta elevatória deve ser convexo para montante.
Reservatório de ar comprimido	$\rho^* = \frac{cV_0}{gH_0} < 1$	O perfil da conduta elevatória deve ser, preferencialmente, convexo para jusante.

Thorley (2004) também propõe um diagrama simples de auxílio ao processo de escolha do dispositivo a adoptar, para protecção contra os efeitos dos regimes transitórios, em sistemas hidráulicos em geral.

- Origem do regime transitório
  - Extremidade de montante
    - Inicialmente ocorre uma sobrepressão
      - RAC ou Reservatório de Membrana
      - Válvula de Retenção
      - Válvula de Alívio
      - Chaminé de Equilíbrio
    - Inicialmente ocorre uma depressão
      - RAC ou Reservatório de Membrana
      - "By-pass"
      - Válvula de Retenção
      - Ventosa
  - Extremidade de jusante
    - Inicialmente ocorre uma sobrepressão
      - RAC ou Reservatório de Membrana
      - Válvula de Alívio
      - Chaminé de Equilíbrio
    - Inicialmente ocorre uma depressão
      - RAC ou Reservatório de Membrana
      - Reservatório Unidireccional
      - Chaminé de Equilíbrio
      - Ventosa

Figura 5.37. Diagrama de apoio à decisão na escolha de dispositivos de protecção contra o golpe de aríete (Adaptado de Thorley, 2004)

Após a selecção do mecanismo de protecção, dever-se-á avaliar se será benéfico prever a instalação de dispositivos complementares noutros pontos da conduta e, finalmente, será iniciado o dimensionamento do sistema definido.

Do diagrama apresentado foi excluída uma linha de orientação, para situações em que a origem do golpe de aríete se encontra numa secção intermédia da conduta. Normalmente, estes casos acontecem em sistemas hidráulicos providos de um “booster”, instalação de bombagem fora do âmbito do presente texto.

Em algumas situações pode ser possível a utilização de dispositivos adicionais na mesma instalação elevatória, que permitam atenuar os efeitos dos regimes transitórios em determinadas secções críticas do sistema. Da adopção desta medida podem, eventualmente, resultar menores dimensões do dispositivo de protecção principal e, com isto, garantir um investimento menos oneroso (Ramos, 1979).

Na Figura 5.38 é apresentado um esquema com os locais de maior eficácia para diversos equipamentos associados ao controlo das variações máximas de pressão, devidas ao golpe de aríete.
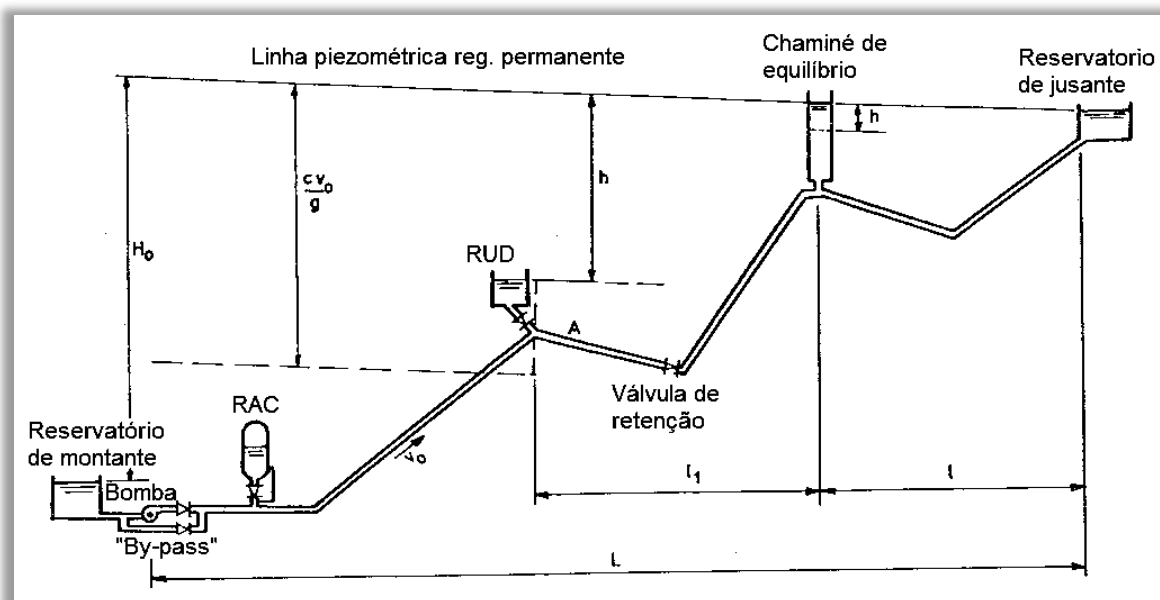
Figura 5.38. Localização comum para instalação de diversos dispositivos de protecção contra o golpe de aríete (Stephenson, 1989)

Na escolha dos equipamentos a instalar, deve ser tido em conta outro aspecto importante, como a o local disponível para sua instalação e operações de manutenção.

6. EXEMPLO PRÁTICO DE ANÁLISE PRELIMINAR DO GOLPE DE ARÍETE, NUM SISTEMA ELEVATÓRIO

No presente capítulo, é feita uma exposição completa dos cálculos, associados ao estudo preliminar do golpe de ariete, num sistema elevatório. Para tal, preparou-se um exemplo, em que se verifica a necessidade de recorrer ao pré-dimensionamento de um dispositivo, para protecção contra as variações máximas de pressão, decorrentes de um regime transitório.

O reservatório de ar comprimido (RAC), foi o equipamento seleccionado, e dimensionado.

Existem diversos métodos empíricos, para determinação aproximada do volume de reservatórios de ar comprimido, sendo a maioria baseado em ábacos e tabelas. No presente caso, serão utilizados os ábacos desenvolvidos por Parmakian (1963).

6.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO SISTEMA ELEVATÓRIO

Considere-se um sistema elevatório simples, provido de dois grupos electrobomba, em regime de funcionamento 1+1 (reserva), de acordo com o esboço apresentado na Figura 6.1.
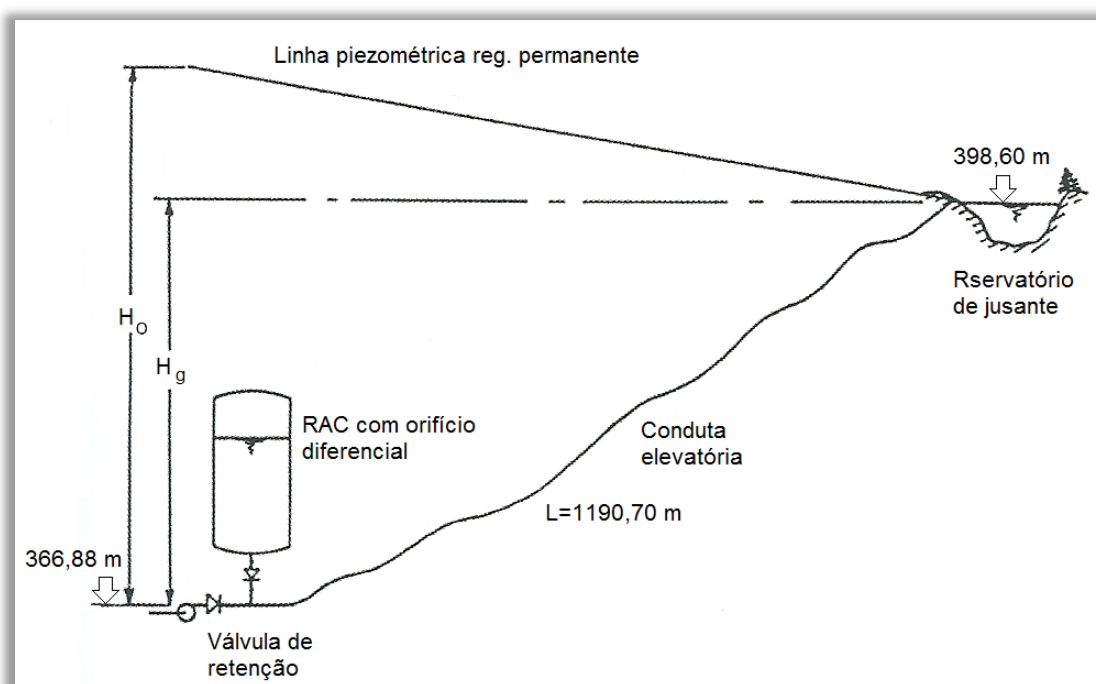
Figura 6.1. Esboço das características gerais do sistema elevatório que serve de exemplo

Na análise preliminar, assumir-se-á a anulação instantânea do caudal, logo após o corte de energia eléctrica ao motor da bomba e que os reservatórios de montante e jusante apresentam volumes muito grandes, não havendo variação do nível de líquido nos mesmos.

As características gerais do sistema elevatório são as indicadas a seguir:

- Comprimento da conduta elevatória..1190,70 m
- Dimensão Nominal da conduta elevatória..160
- Material da conduta elevatória .... PVC rígido
- Pressão nominal da tubagem..10 bar
- Espessura das paredes da conduta..7,70 mm
- Diâmetro interno da conduta elevatória ....144,60 mm
- Caudal de dimensionamento da bomba.. 12,40 l/s
- Velocidade de escoamento na conduta elevatória.....................................0,75 m/s
- Nível do reservatório de entrega (jusante) ....398,60 m
- Nível do reservatório de aspiração (montante) ....366,88 m

6.2. DETERMINAÇÃO DAS ENVOLVENTES MÁXIMAS DE PRESSÃO

No caso de condutas, com secção transversal circular, e comportamento elástico e linear, a celeridade, c, é calculada pela expressão:

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + \left(K_c \times \frac{DI}{e}\right)}} = 381\ m/s$$

Com K_c, o coeficiente em função do módulo de elasticidade do material da conduta, neste caso PVC, igual a 33,3.

O comprimento crítico é dado pela equação seguinte:

$$L_c = \frac{T_a \times c}{2} = \frac{4{,}61 \times 381}{2} = 878{,}61\ m$$

Com T_a, o tempo de anulação de caudal, obtido pela fórmula simplificada de Mendiluce, função da extensão da conduta elevatória, e da inclinação média da mesma.

O tempo de ida e retorno de uma onda elástica, ao ponto onde tem origem a perturbação, obtém-se do seguinte modo:

$$\frac{2 \times L}{c} = \frac{2 \times 1190{,}71}{381} = 6{,}24\ s$$

Como o tempo de anulação de caudal (T_a = 4,61 s), é inferior ao tempo correspondente à ida e retorno de uma onda elástica, então a manobra é considerada rápida. Desta forma, na secção de execução da manobra, não é verificado qualquer efeito atenuante da depressão, inerente ao aparecimento de ondas reflectidas no reservatório de jusante.

Para manobras rápidas e, considerando apenas a secção imediatamente a jusante da válvula, pode recorrer-se á fórmula de Allievi, para determinação do golpe de aríete:

$$\Delta H = \frac{c \times V_0}{g} = \frac{381 \times 0{,}75}{9{,}81} = 29{,}28\, m$$

Com o valor obtido para o choque hidráulico, teremos como pressões máxima e mínima, na conduta elevatória, junto à válvula de retenção geral:

$$\Delta H_{máx.} = 31{,}72 + 29{,}28 = 61{,}00\, m$$

$$\Delta H_{mín.} = 31{,}72 - 29{,}28 = 2{,}44\, m$$

Na Figura 6.2, estão representadas as envolventes teóricas de sobrepressão e de depressão máximas, que ocorrem durante o regime variável em pressão, no presente caso.
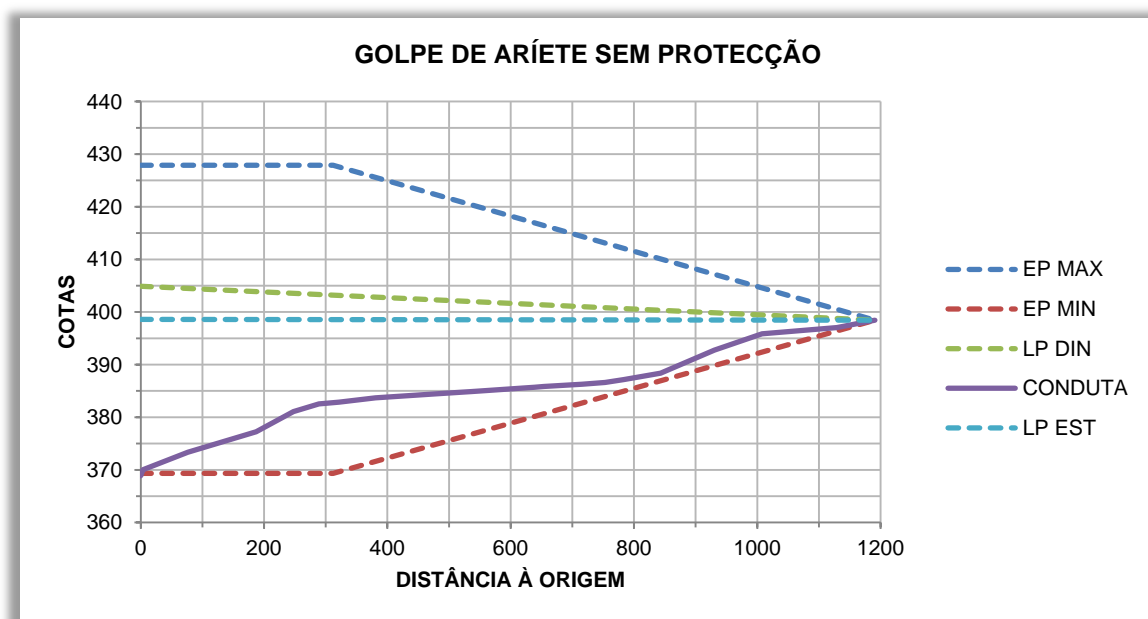
Figura 6.2. Representação gráfica das envolventes de pressão extrema (perfis teóricos), sem dispositivos de protecção da conduta elevatória

Perante a classe de pressão de serviço, e o perfil da conduta, os valores verificados para a depressão máxima são inadmissíveis. O facto da conduta elevatória, na totalidade da sua extensão, se encontrar em depressão, chegando a atingir valores máximos, na ordem dos 13,60 metros, impõe a aplicação de um sistema de protecção da tubagem.

Relativamente às sobrepressões máximas, o seu valor é de cerca de 60 m. Uma vez que o líquido escoado é água, então, a pressão nominal da conduta é idêntica à pressão máxima de serviço, permitida pelo material da conduta. Assim, a pressão interna máxima, admitida pela conduta, será igual a 10 kg/cm^2, pelo que as sobrepressões, resultantes do golpe de aríete, serão suportadas pela mesma.

6.3. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UM RESERVATÓRIO DE AR COMPRIMIDO

Do estudo efectuado no ponto anterior, concluiu-se que será necessário, prever um dispositivo de protecção da conduta elevatória, contra o golpe de aríete, em particular, contra as depressões. O reservatório de ar comprimido (RAC) foi seleccionado com o objectivo de cumprir tal função.

Será utilizado um método empírico, proposto por Parmakian (1963), o qual se baseia em ábacos, construídos para determinação do volume necessário, que permita garantir a eficácia da acção de um RAC, na protecção contra o golpe de aríete.

Pressupostos inerentes à utilização dos ábacos do autor:

- O reservatório de ar comprimido (RAC) está instalado perto da bomba;
- O fecho da válvula de retenção ocorre imediatamente após o corte de energia;
- A relação pressão volume para o ar comprimido no interior do RAC é $H \times C^{1,2}$, constante;
- A razão da perda de carga total, para o mesmo caudal, associada à entrada e à saída Do reservatório de ar comprimido é de 2,5 para 1; KH_0^* representa o somatório das perdas de carga contínuas na conduta e das perdas de carga associadas ao orifício diferencial quando o caudal, Q_0, inverte o sentido de escoamento e passa da conduta para o interior do RAC.

Parâmetros necessários à análise dos ábacos do autor:

- $Q_0 = 0{,}01235\ m^3/s$ (caudal escoado, em regime permanente);
- $A = 0{,}01642\ m^2$ (área da secção transversal de escoamento, da conduta elevatória)
- $V_0 = 0{,}75\ m/s$ (velocidade de escoamento, em regime permanente)
- $c = 381\ m/s$ (celeridade das ondas de choque)
- $L = 1190{,}71\ m$ (comprimento da conduta elevatória)
- $K = 0{,}3$ (coeficiente de perda de carga, tal que KH_0^*, representa a perda de carga total, associada à entrada do caudal, Q_0, no reservatório de ar comprimido)
- $P_{atm} = 10{,}33\ m$ (pressão atmosférica)
- $H_0^* = 48{,}34\ m$ (carga absoluta, em regime permanente)

Os valores verificados para a sobrepressão máxima ao longo da conduta elevatória, durante o regime transitório, são suportados pela própria conduta, dado que a pressão máxima de serviço da tubagem

é igual a 10 Kg/cm^2. Por esta razão o cálculo do volume da câmara incidiu apenas na protecção da conduta contra as depressões máximas.

Assim, pretende-se dimensionar o dispositivo de protecção da conduta contra o golpe de aríete, de forma a limitar a depressão máxima a que a conduta fica sujeita durante o regime de transição, na sua secção intermédia a $0,22H_0^*$, ou seja, o valor da depressão máxima nesta secção não deverá ser superior a 10,44 metros.

O parâmetro característico da conduta é definido pela expressão seguinte:

$$\rho^* = \frac{cV_0}{2gH_0^*} = \frac{381 \times 0,75}{2 \times 9,81 \times 48,34} = 0,3$$

Admitiu-se um coeficiente de perda de carga associado ao orifício diferencial, $K = 0,3$ e sabe-se que a perda de carga ao longo desta instalação é de cerca de 6,29 m, pelo que o orifício diferencial deverá provocar uma perda de carga localizada durante a entrada do caudal, Q_0, no reservatório de ar comprimido dada por:

$$KH_0^* - 6,29 = (0,3 \times 48,34) - 6,29 = 8,21\ m$$

Recorrendo ao ábaco da Figura 6.3, calculou-se o volume mínimo de ar comprimido no interior do reservatório.

Para a análise da solução gráfica proposta pelo autor, foram necessários parâmetros seguintes:

$$2\rho^* = 2 \times 0,30 = 0,60$$

$$\frac{2C_0a}{Q_0L} = 9$$

Foram admitidos vários valores, para o segundo parâmetro, necessário ao estudo da solução gráfica, até ser encontrado um, que verifique as condições impostas inicialmente, sendo este igual a 9.

Os números nas curvas são valores de $2\rho^*$.
Secção da conduta junto à bomba
Metade da extensão da conduta
Golpe de aríete em condutas elevatórias, K=0,3
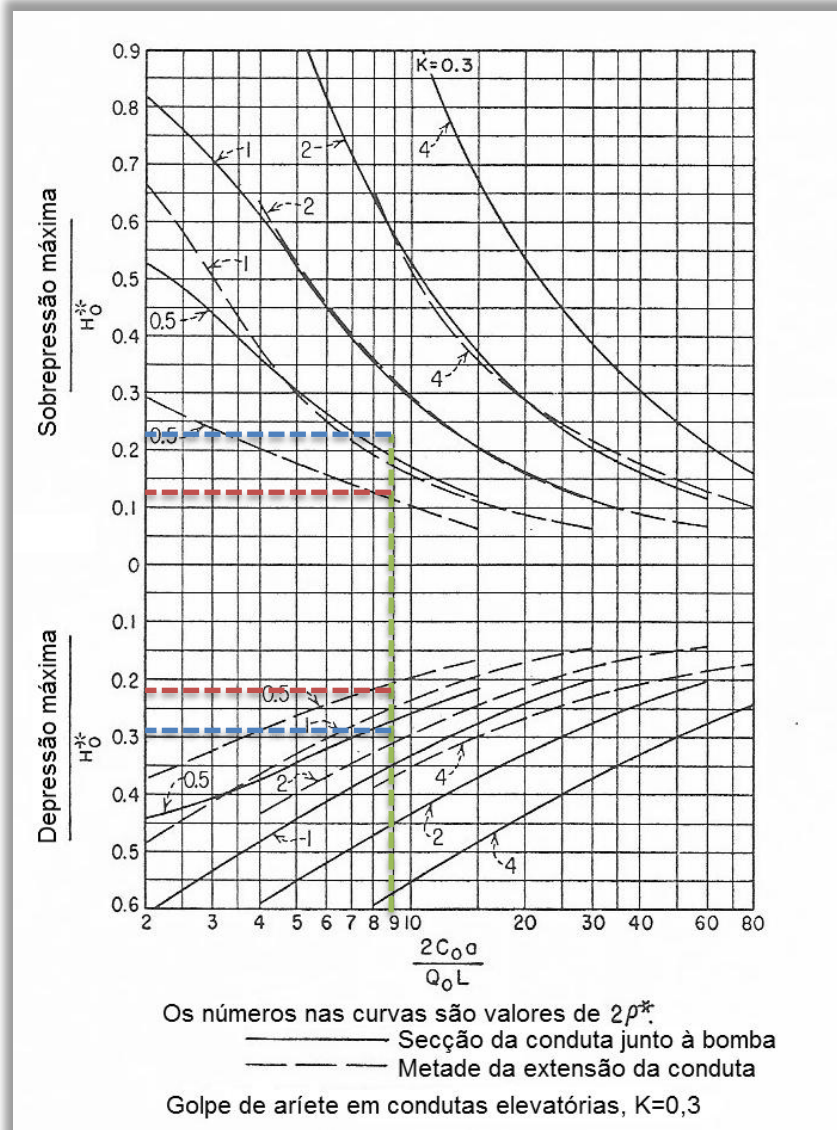
Figura 6.3. Ábaco de apoio ao pré-dimensionamento de um RAC, K=0,3 (Adaptado de Parmakian, 1963)

Da análise do ábaco, associado a um coeficiente de perda de carga, $K = 0{,}3$, e aplicando os dois parâmetros mencionados anteriormente, verificou-se que a depressão máxima, na secção da conduta adjacente à bomba, será de $0{,}29H_0^*$, enquanto na secção intermediária da conduta elevatória, esta será de $0{,}22H_0^*$.

Desta forma, obtêm-se os resultados seguintes:

- Na secção da conduta elevatória adjacente bomba:

$$Depressão\ máxima = 0{,}29H_0^* = 14{,}02\ m$$

$$Sobrepressão\ máxima = 0{,}23H_0^* = 11{,}12\ m$$

- Na secção intermédia da conduta elevatória $(L/2)$:

$$Depressão\ máxima = 0{,}22H_0^* = 10{,}63\ m$$

$$Sobrepressão\ máxima = 0{,}13H_0^* = 6{,}28\ m$$

Portanto, os valores obtidos graficamente, encontram-se dentro dos limites estabelecidos, na fase inicial.

Conhecido o valor de $\frac{2C_0a}{Q_0L}$, o volume mínimo de ar comprimido, no interior da câmara, é dado pela expressão que a seguir se apresenta:

$$\frac{2C_{0mín.}a}{Q_0L} = 6 \Leftrightarrow \frac{2 \times C_{0mín.} \times 381}{0{,}01235 \times 1190{,}71} = 9 \Leftrightarrow C_{0mín.} = 0{,}17\ m^3$$

Ao volume de ar acima do nível superior de emergência (volume mínimo, $C_{0mín.}$), acresce o volume entre este e o nível inferior, que será igual a 20% de $C_{0mín.}$. Assim, ter-se-á:

$$C_{0máx.} = 1{,}2 \times C_{0mín.} = 0{,}21\ m^3$$

Para garantir que não ocorrerá entrada de ar na conduta elevatória, quando a depressão máxima é atingida, o volume total de ar, no interior da câmara deverá ser superior a C', definido pela equação:

$$C' = C_0 \left(\frac{H_0^*}{H_{mín.}^*}\right)^{1/1.2}$$

Onde $H_{mín.}^*$ resulta da diferença entre H_0^* e a depressão máxima verificada junto à bomba.

Para o novo volume máximo calculado, $C_{0máx.} = 0{,}21\ m^3$, tem-se que:

$$\frac{2C_{0máx.}a}{Q_0L} = \frac{2 \times 0{,}21 \times 381}{0{,}01235 \times 1190{,}71} = 10{,}8$$

Recorrendo aos mesmos ábacos utilizados antes, e para o novo valor do parâmetro calculado de $C_{0máx.}$, verifica-se que a depressão máxima, na secção adjacente à bomba é igual a $0{,}26H_0^*$, ou seja, 12,57 m.

O valor de $H_{mín.}^*$ é, então, dado por:

$$H_{mín.}^* = 48{,}34 - 12{,}57 = 35{,}77\ m$$

Finalmente, o volume total da câmara é determinado pela expressão:

$$C' = C_{0máx.} \left(\frac{H_0^*}{H_{mín.}^*}\right)^{1/1.2} = 0{,}21 \times \left(\frac{48{,}34}{35{,}77}\right)^{1/1.2} = 0{,}27\ m^3$$

Na Figura 6.4, são representadas as envolventes de sobrepressão, e de depressão máximas, que ocorrem durante o regime variável em pressão, com actuação do dispositivo de protecção, a instalar na conduta elevatória:
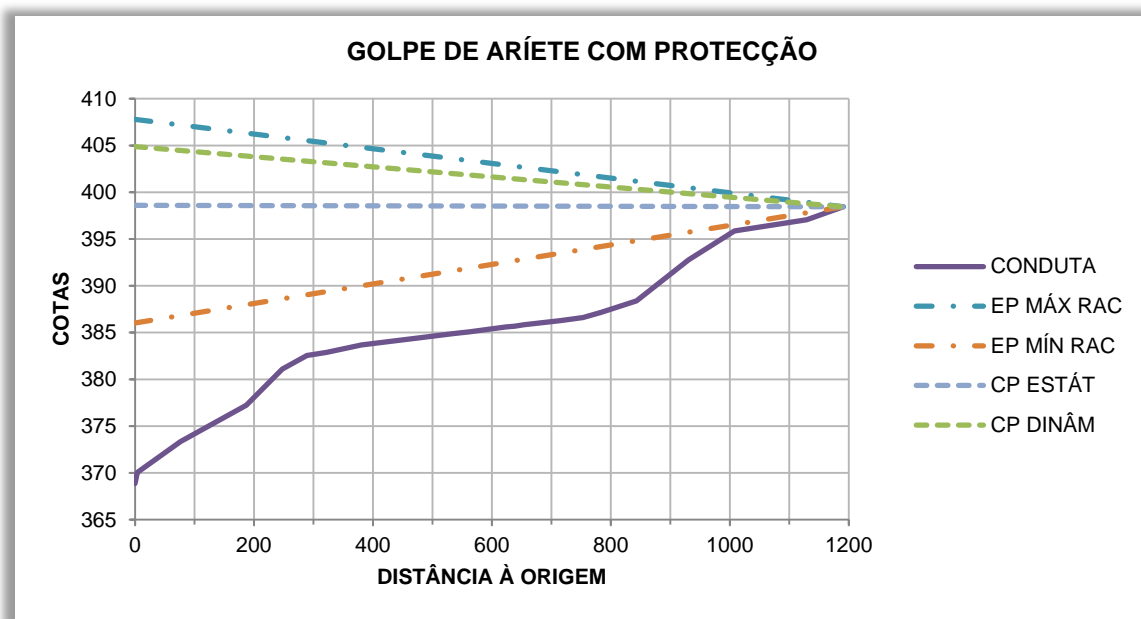
Figura 6.4. Representação gráfica das envolventes de pressão extremas, considerando a acção do dispositivo de protecção adoptado.

Como é possível verificar pela figura anterior, a acção de um dispositivo de protecção da conduta, com as características daquele que foi dimensionado, permite reduzir de forma significativa as variações máximas de pressão, garantido assim a integridade estrutural funcional do sistema elevatório.

7. SÍNTESE, CONCLUSÕES E CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

Os conceitos básicos sobre protecção de sistemas elevatórios contra as variações máximas de pressão estão, actualmente, bem definidos e testados, podendo assumir as mais diversas formas. No presente trabalho foram descritas, de forma extensa, algumas técnicas, simples e práticas, de prevenir directamente a ocorrência de regimes rapidamente transitórios, ou do golpe de aríete. Foi também realizada uma exposição dos equipamentos convencionais, com maior aceitabilidade e aplicação em sistemas hidráulicos, para protecção dos efeitos do fenómeno referido.

Para melhor interpretação dos processos associados ao tema "protecção contra o choque hidráulico em conduta forçadas", foi feito um enquadramento prévio, onde foram introduzidas algumas bases de natureza teórico-prática, relativamente aos regimes transitórios. Naturalmente, foi dedicada atenção aos regimes rapidamente transitórios.

Para melhor consolidar a exposição, apresentou-se um exemplo de cálculo simples, relativamente ao estudo preliminar do golpe de aríete num sistema elevatório. O exemplo, intencionalmente preparado para ilustrar algumas questões particulares, impunha ao sistema condições de funcionamento não aceitáveis, decorrentes das variações máximas de pressão. Desta forma procurou explicar-se, de forma clara, dos procedimentos de cálculo e análise gráfica, associados à utilização de um método expedito de dimensionamento, ao nível de uma fase de estudo prévio, de um dispositivo de protecção.

LNEC (1979), por intermédio da sua Divisão de Hidráulica Sanitária, a um inquérito junto de projectistas, de fornecedores de equipamento, e de entidades responsáveis pela exploração de sistemas elevatórios, de águas e águas residuais, em Portugal. Umas das várias conclusões do referido inquérito, prende-se com a preferência dos grupos intervenientes referidos, pelo reservatório de ar comprimido, para protecção de condutas elevatórias, contra o golpe de aríete (cerca de 46% dos inquiridos). Os números do estudo ditaram ainda que as válvulas de descarga automática, com 28,6% de preferência, representavam o segundo dispositivo mais aplicado, seguindo-se o volante de inércia e o reservatório unidireccional, com 12,7 e 9,5% de preferência, respectivamente. As chaminés de equilíbrio provaram ter pouca aceitação na indústria de engenharia hidráulica em Portugal, surgindo com apenas 1,6% de utilizadores frequentes.

Almeida (1982) justifica a preferência dos projectistas pelos RAC com a existência de diversas tabelas e ábacos de dimensionamento, factor que facilitava, significativamente, o trabalho daqueles técnicos, na época.

Actualmente, pela sensibilidade que o autor desta dissertação desenvolveu, através do contacto directo com entidades de exploração de sistemas hidráulicos e com outros projectistas, estima-se que os resultados do inquérito mencionado antes estejam significativamente desactualizados, até porque foram desenvolvidas outras tecnologias mais eficiente e de maior simplicidade de exploração.

De acordo com impressões gerais recolhidas na comunidade técnica, os reservatórios de membrana, pela sua elevada robustez, versatilidade e facilidade de exploração, deverão representar uma fatia, não inferior a dois terços, dos dispositivos usados para protecção contra os efeitos do golpe de aríete.

Pelo diagrama apresentado na Figura 5.37, adaptado de Thorley (2004), percebe-se que os RAC e os reservatórios de membrana são adequados a qualquer uma das condições analisadas, o que reforça a expectativa de que a sua utilização acontece em grande escala, face aos restantes mecanismos existentes.

Na presente dissertação foram tratados, essencialmente, casos de relativa simplicidade, associados aos regimes transitórios em pressão, em particular ao golpe de aríete. Existem, contudo, sistemas hidráulicos de escoamento em pressão de muito maior complexidade. Porém, estes sistemas complexos não se enquadram nos objectivos que nortearam o autor. Pretende-se que este texto seja de utilidade prática para quem, por interesse natural ou por simples necessidade, procure informação introdutória sobre métodos de protecção contra o golpe de aríete em condutas elevatórias.

Espera-se que este documento venha a representar uma "porta aberta" para que seja dada continuidade ao desenvolvimento de trabalhos sobre o tema. Seria particularmente interessante incentivar novos pequenos trabalhos enquadráveis no período de um semestre, disponível para a elaboração da dissertação. Deixam-se sugestões:

- Actualização da informação sobre o tipo e quantidade de dispositivos de protecção utilizados em Portugal, utilizando-se inquéritos, inventariando acidentes que tenham ocorrido e que pudessem ser caracterizados;
- Compilação simbólica, de métodos empíricos de dimensionamento preliminar de dispositivos, elaborados por diferentes autores, procedendo à análise de resultados para condições base semelhantes;
- Análise comparativa dos resultados dos métodos expeditos com os dados de dimensionamento obtidos através do cálculo automático computorizado;
- Comparação económica dos vários tipos de dispositivos e obtenção de funções de custo portuguesas para estimar de forma imediata os custos respectivos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abecasis, F. M. (1979), Escoamentos em Pressão em Regime Variável: Chaminés de Equilíbrio, in: *O Golpe de Aríete em Condutas*, LNEC, Seminário 238, Lisboa.

Almeida, A. B. (1982), *Manual de Protecção Contra o Golpe de Aríete em Condutas Elevatórias*, LNEC, Lisboa.

Almeida, A. B. (1981), *O Golpe de Aríete em Condutas Elevatórias - Síntese dos Conhecimentos Actuais*, Memória Nº550, LNEC, Lisboa 1981.

Almeida, A. B. (1979), O Golpe de Aríete e o Projecto de Condutas Elevatórias, in: *O Golpe de Aríete em Condutas*, LNEC, Seminário 238, Lisboa.

Almeida, A. B. (1982), Os Regimes Transitórios nas Condutas Elevatórias e Análise Preliminar do Golpe de Aríete, in: *Estações Elevatórias - Saneamento Básico*, Vol. 2, Ministério da Habitação, Obras Públicas e Transportes, LNEC, Lisboa.

Almeida, A. B. (1991), Protecção Contra o Golpe de Aríete, in: *Manual de Saneamento Básico*, Volume 1 – Elementos Gerais, Ministério do Ambiente e dos Recursos Naturais, Direcção-Geral dos Recursos Naturais, Lisboa.

Almeida, A. B. (1981), *Regime Hidráulico Transitório em Condutas Elevatórias*, Dissertação de Doutoramento no Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1981.

Anspach, K. (1979), Flywheels and Air Vessels as Security Devices, in: *O Golpe de Aríete em Condutas*, LNEC, Seminário 238, Lisboa.

AVK Válvulas, SA, (2004), *Válvula de Retenção AVK, com Alavanca, Molas e Suporte para Válvulas Série 41/60 – Folha Técnica*, http://www.avkvalvulas.com; 4 de Junho de 2011.

Charlatte Réservoirs (2006), Anti-bélier à vessie – Fonctionnement détaillé, http://www.charlatte.fr; 10 de Abril de 2011.

Chaudry, M. H. (1987), *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand, Second Edition, New York.

Dupont, A. (1979), *Hidraulique Urbaine*, Tome 2 – Ouvrages de Transport, Élévation et Distribuition des Eaux, Eyrolles, Quatriéme Édition, Paris.

Erhard Valves, 2006, *Erhard Non Slam Nozzle Check Valve - Operating Instructions*, http://erhard.de/index.php?Non-slam-nozzle-check-valve-EDRV-Valves; 4 de Junho de 2011.

Fucoli-Somepal, SA, 2011, *Válvula de Retenção com Alavanca e Contrapeso, Modelo Supra – Ficha Técnica*, http://www.fucoli-somepal.pt, 4 de Junho de 2011.

FCT-UNL (2006), *Choque Hidráulico, Consequências e Protecções*, Informação Académica da Disciplina de Hidráulica Geral.

Kothe, B. (2008), Surge Calculations for Piping Systems and Their Consequences on Everyday Work Estações, in: *Seminário Elevatórias de Águas Residuais*, Cascais, 11 de Novembro de 2010, KSB - Bombas e Válvulas SA.

Lencastre, A. (1996), *Hidráulica Geral*. Armando Lencastre, Lisboa.

Li, W. H. (1962), Mechanics of Pipe Flow Following Column Separation, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.88, EM4.

LNEC (1979), Inquérito Sobre o Golpe de Aríete, in: *O Golpe de Aríete em Condutas*, LNEC, Seminário 238, Lisboa.

Mori E. (2011), *Earmi - Enciclopedia delle armi*, http://www.earmi.it/armi/glossario01.htm; 7 de Abril de 2011).

Palmstrom, A. (2008), *Air Cushion Surge Chamber. A Cost-effective Solution in Hidropower Design*, http://www.rockmass.net/files/air_cushion_surge_chambers.pdf; 10 de Abril de 2011.

Parmakian, J. (1963), *Waterhammer Analysis*, Dover Publications, New York.

Popescu, M., Arsenie, D. and Vlase, P. (2003), *Applied Hydraulic Transients for Hydropower and Pumping Stations*. Balkema Publishers, Lisse.

Quintela, A. C. (1979), Introdução do Estudo de Movimentos Variáveis, in: *O Golpe de Aríete em Condutas*, LNEC, Seminário 238, Lisboa.

Ramos, C. M. (1979), Análise de Dispositivos de Protecção de Condutas Contra o Golpe de Aríete num Sistema de Bombagem, in *O Golpe de Aríete em Condutas*, LNEC, Seminário 238, Lisboa.

Rosich, E. M. (1965*), Investigatión Teórico-prática de los Valores Reales del Golpe de Ariete por Parada Brusca de Grupo Motobomba en Impulsiones*, Dyna, Nº3 e Nº4.

Saint-Gobain PAM (2006), *Aparelhos de regulação – Válvula de Descarga*, http://www.saint-gobain-pam.pt; 10 de Março de 2011

Sharp, B. B. and Sharp, D. B. (1996), *Water Hammer – Practical Solutions*, Arnold, London.

Stephenson, D. (1989), *Pipeline Design for Water Engineers*, Elsevier, Third Edition, Amsterdam.

Swaffield, J. A. and Boldy, A. P. (1993), *Pressure Surges en Pipe and Duct Systems*, Avebury Technical, Hampshire.

Tchobanoglous, G. (1981), *Wastewater Engineering - Collection and Pumping of Wastewater*, McGraw-Hill.

Thorley, A. R. D. (2004), *Fluid Transients in Pipeline Systems - A Guide to the Control and Suppression of Fluid Transients in Liquids in Closed Conduits*, ASME Press, Second Edition, New York.

Tomaz, P. (2010), *Golpe de Aríete em Casas de Bombas*, Navegar, 2010.

Wylie, E. B. and Streeter, V. L., with Suo, L. (1993), *Fluid Transients in Systems*, Prentice Hall.

Záruba, J. (1993), *Water Hammer in Pipe-Line Systems*, Elsevier, Amsterdam.